Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : le groupe des végétaux. Une reconstruction didactique basée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre.

Robin Bosdeveix

▶ **To cite this version:**

Robin Bosdeveix. Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : le groupe des végétaux. Une reconstruction didactique basée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre.. Education. Université Paris Diderot - Paris 7- Sorbonne Paris Cité, 2016. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-01372907⟩

HAL Id: tel-01372907

https://theses.hal.science/tel-01372907v1

Submitted on 27 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HAL Authorization

Université Paris Diderot - Paris 7

Université Sorbonne Paris Cité

École Doctorale « Savoirs scientifiques »

Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR)

Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : le groupe des végétaux

Une reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre

Par Robin BOSDEVEIX

DOCTORAT

Spécialité : Didactique des disciplines, sciences de la vie

Thèse dirigée par Yann LHOSTE (Directeur) et Stéphane SCHMITT (Co-directeur)

Soutenue le mercredi 15 juin 2016

JURY

M. Christian Orange, Université Libre de Bruxelles (Belgique)	Président de jury et Rapporteur
Mme Liliane Dionne, Université d'Ottawa (Canada)	Rapporteure
Mme Cécile de Hosson, Université Paris Diderot	Examinatrice
M. Guillaume Lecointre, MNHN	Examinateur
M. Yann Lhoste, Université de Bordeaux	Directeur
M. Stéphane Schmitt, CNRS & Université Paris Diderot	Co-directeur

Remerciements

À Emmanuelle, Coline et Esteban, à qui je dédie cette thèse, pour votre soutien constant et votre compréhension durant ces cinq années de doctorat très prenantes...

Mes remerciements vont en premier lieu à Yann Lhoste et Stéphane Schmitt, qui ont dirigé cette recherche doctorale.

Cette thèse est née de belles rencontres, tant scientifiques qu'humaines. En 2009, la création de l'association pour la formation des professeurs de SVT (AFPSVT) m'a permis de rencontrer Yann Lhoste, alors maître de conférence en didactique à l'université de Caen. Nous avons contribué ensemble à faire naître ce beau collectif réunissant les différentes disciplines impliquées dans la formation des enseignants. À cette occasion, j'ai été impressionné par l'expertise de Yann que lui apportait son activité de recherche en didactique des sciences de la vie et de la Terre. Débutant en 2010 mon master recherche en didactique, Yann a accepté d'encadrer mon mémoire de recherche de M2. Je remercie Yann d'avoir accepté de diriger ma thèse malgré la distance de Paris, depuis Caen puis Bordeaux. Je lui dois également beaucoup dans mon entrée dans la communauté de recherche en didactique des sciences, à travers l'ARDiST, le séminaire problématisation du CREN à Nantes et le séminaire de didactique des sciences de la Terre piloté par Denise Orange Ravachol. Yann a su trouver le difficile équilibre dans la direction de ma thèse. Il m'a laissé beaucoup d'autonomie, ce que j'ai particulièrement apprécié, tout en cadrant mes prospections et en m'apportant de précieux conseils, nourrissant ma réflexion.

C'est dans un second temps, en 2011, que j'ai rencontré Stéphane Schmitt, historien de la biologie à l'UMR SPHERE (CNRS – Paris Diderot), quand s'est précisé mon sujet de thèse à l'interface entre didactique et histoire de la biologie. Sa très grande culture, sa qualité d'écoute m'ont marqué dès notre première rencontre. Je lui suis très reconnaissant d'avoir accepté d'encadrer une thèse dans un domaine interface, attestant de sa grande ouverture d'esprit et de son profond intérêt pour l'enseignement, remontant à l'agrégation que nous avons préparé au même endroit à quelques années d'écart. N'ayant pas étudié l'histoire des sciences avant de m'engager en thèse, Stéphane a su m'accompagner dans ma formation et répondre à mes questions. Je l'en remercie sincèrement.

Mes remerciements vont également aux rapporteurs, Christian Orange et Liliane Dionne, venus spécialement de Bruxelles et d'Ottawa, ainsi qu'aux examinateurs, Cécile de Hosson et Guillaume Lecointre. Merci pour leurs lectures attentives du manuscrit, leurs remarques et leurs questions constructives.

Je remercie tout particulièrement l'UFR Sciences du Vivant et l'Université Paris Diderot qui m'ont soutenu avec vigueur, en m'accordant une décharge d'enseignement de 192h renouvelée à quatre reprises. Je pense également à tous mes collègues du service d'enseignement qui ont permis que ma décharge ne pèse pas sur les étudiants.

Cette recherche doctorale a été une véritable aventure collective. Je tiens à rendre hommage à tous ceux qui ont compté et qui, je l'espère, continueront longtemps de marquer ma vie professionnelle et personnelle.

• Leslie Regad m'a donné le goût des analyses statistiques et de la programmation sous R : c'est peu dire ! Travailler avec Leslie sur l'analyse quantitative des données a été stimulant et enthousiasmant. Opiniâtre et perspicace, Leslie n'abandonne jamais tant que qu'elle n'est pas arrivée à ses fins ! Une vraie leçon de méthodologie…

• Vincent Chassany a joué un rôle essentiel dans cette thèse, qui lui doit énormément. Extrêmement cultivé en biologie et très disponible, nos échanges scientifiques ont été continus dans notre bureau commun du bâtiment Buffon. Au delà de ces échanges enrichissants, Vincent a accepté de participer à l'expérimentation didactique et a mis en œuvre la séance de débat sur les articles scientifiques à trois reprises. Ses grandes qualités pédagogiques lui ont permis d'animer la séance avec talent, favorisant la prise de parole des étudiants et poussant à la reformulation et l'explicitation de la pensée des étudiants. Vincent, je te suis infiniment reconnaissant.

• Martine Pernodet et Nathalie Octo ont accepté de créer une séance d'anglais basée sur les articles scientifiques au cœur de la reconstruction didactique et de la mettre en œuvre à deux reprises. Je vous remercie pour votre dynamisme, votre générosité et votre temps.

• Murielle Cauchies m'a apporté une aide technique importante pour le tournage et le montage des vidéos de la séquence. Merci pour ta disponibilité et le partage de tes compétences.

• Jean-François Mauffrey et Patrick Laurenti ont relu un chapitre de la thèse. Merci pour vos remarques pertinentes ayant fait avancé ma réflexion.

• Roland Bosdeveix, mon père, a relu l'intégralité du manuscrit et a apporté de très nombreuses améliorations orthographiques et stylistiques. Un immense merci pour ces nombreuses heures que tu as consacrées à cette relecture ! Merci également à ma mère, Martine Bosdeveix, ainsi que mes beaux-parents, Paquita Rodriguez et Renan Foucré. Vous avez été très présents : mille mercis pour votre présence et votre soutien !

D'autres personnes ont énormément compté dans cette thèse. Il s'agit des membres de mon laboratoire, le LDAR (Laboratoire de Didactique André Revuz). Cela fait chaud au cœur d'appartenir à ce collectif.

Mes remerciements vont en premier lieu à Cécile de Hosson. Mon entrée dans la recherche en didactique lui revient pour une très grande part. Nous nous sommes rencontrés en 2005 grâce à la licence EICS (professorat des écoles et médiation scientifique), dans laquelle nous avons assuré ensemble les enseignements de didactique des sciences. Travailler avec Cécile m'a montré ce qu'apporte l'expertise didactique issue d'une activité de recherche. C'est grâce à elle que j'ai osé me lancer dans le M2 Recherche de didactique … des sciences physiques ! Depuis Cécile a soutenu son habilitation des recherches en 2011, qui a inspiré mes propres recherches. Devenue professeure et directrice du laboratoire, elle fait vivre une dynamique de recherche avec un incroyable élan collectif et une attention aux personnes hors du commun. Merci pour ce que tu es et pour ce que tu nous apportes !

Je tiens également à remercier Laurence Viennot, Nicolas Decamp, Isabelle Kermen et Patricia Crépin-Obert, pour tous vos conseils bienveillants durant ces cinq années. Les échanges durant nos différentes réunions ont été très bénéfiques. Quelle richesse, quelle densité et quelle joie partagée durant notre séminaire alpin à La Salle Les Alpes chez Laurence… Des souvenirs ancrés dans ma mémoire pour toujours ! Merci Laurence pour toutes ces discussions à Condorcet, pour tes conseils, tes suggestions bibliographiques, devant un café ou ta bouilloire servant de matériel expérimental ou tes playmobiles protégés du grand froid avec leur couverture chauffante ! Sans toi, je n'aurais jamais été accepté à l'école d'été d'ESERA en 2012… Merci Nicolas pour ta perspicacité, ton analyse critique fine et tes remarques toujours bien ciblées. Merci Isabelle pour ta confiance et tes conseils avisés qui datent de la première heure (dès mon mémoire de master que tu as évalué). Merci Patricia pour nos échanges réguliers, notamment sur les liens entre histoire et didactique et sur la

problématisation. Notre proximité disciplinaire (SVT) et le travail conjoint en enseignement nous rapprochent beaucoup, au delà de notre amitié.

Mes pensées vont également bien évidemment aux doctorants du LDAR, dont beaucoup sont aujourd'hui docteurs ! Valentin Maron et Luz Martinez tout d'abord avec qui j'ai passé plusieurs années dans le bureau des doctorants à Condorcet ! Que de discussions passionnantes, difficiles à arrêter… Mais aussi de bons moments à se soutenir mutuellement dans les moments difficiles. Je pense également aux autres doctorants du LDAR, trop nombreux pour tous les citer individuellement, pour les discussions régulières dans les réunions du groupe Jeunes Chercheurs, et en particulier Zoé Mesnil, avec qui j'ai animé le groupe pendant un an.

Cette thèse doit également beaucoup aux échanges réguliers avec mes proches amis et collègues : Karim Benzerara, Emmanuelle Porcher, Damien Jaujard, Yann Bassaglia et Juliette Rochet. Je pense également à Marc-André Selosse pour nos discussions estivales à Belle-Ile ainsi qu'à Sylvie Meyer et Catherine Reeb : notre aventure commune sur l'ouvrage *Botanique* n'est pas étrangère au thème de cette thèse. Merci à Guy Rumelhard pour ses propositions de relecture et ses attentions, notamment l'envoi de textes importants.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des formateurs qui ont fait passé le questionnaire dans 26 masters ainsi que les étudiants qui ont participé à l'enquête, en particulier la promotion 2014/15 du master MEEF SVT des universités Paris Diderot et Paris-Est Créteil (ESPE de l'académie de Créteil).

Table des matières

REMERCIEMENTS 3

TABLE DES MATIÈRES 7

INTRODUCTION 15

CHAPITRE 1 : LES ENJEUX DE LA RECHERCHE 19

1. UNITÉ ET DIVERSITÉ DES CLASSIFICATIONS 20

1.1. Importance des classifications dans la vie quotidienne et dans l'activité scientifique 21

1.2. La pluralité des classifications biologiques 23

2. LES VÉGÉTAUX : UN CONCEPT AUX MULTIPLES VISAGES 36

2.1. Les végétaux dans les classifications fonctionnelles 36

2.2. Les végétaux dans la classification phylogénétique actuelle 38

2.3. Les végétaux, un concept issu d'une histoire scientifique et sociale 41

2.4. Le concept de végétal selon les disciplines biologiques et les problèmes travaillés 48

3. LE PUBLIC ÉTUDIÉ 49

3.1. Les raisons du choix du public 49

3.2. Une recherche positionnée autour d'une réforme de la formation et du recrutement des enseignants 51

4. FÉCONDITÉ D'UNE APPROCHE HISTORIQUE AU NIVEAU DIDACTIQUE 52

4.1. L'histoire des sciences comme moyen d'éclairer les difficultés des apprenants 52

4.2. L'histoire des sciences comme source de problèmes féconds permettant d'élaborer un parcours d'apprentissage 53

4.3. L'histoire des sciences comme approche de la nature de la science 54

5. LE CADRE MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECONSTRUCTION DIDACTIQUE FONDÉE SUR L'HISTOIRE DES SCIENCES ET SON ADAPTATION À NOTRE RECHERCHE 56

5.1. Présentation du cadre méthodologique 56

5.2. Pourquoi mobiliser ce cadre méthodologique dans notre recherche ? 58

5.3. Adaptation du cadre à nos positionnements théoriques spécifiques et à nos objectifs 59

6. PROBLÉMATIQUE ET PREMIÈRE FORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE 65

6.1. Problématique de la thèse 65

6.2. Première formulation des questions de recherche 66

CHAPITRE 2 : ENQUÊTE DIDACTIQUE SUR LES CONCEPTIONS DES VÉGÉTAUX 71

1. POSITIONNEMENT THÉORIQUE SUR LES CONCEPTIONS DES APPRENANTS 72

1.1. La notion de conception en didactique des sciences 73

1.2. Conceptions et obstacles épistémologiques 74

1.3. Les conceptions : des constructions des chercheurs 76

1.4. Bilan sur notre position concernant la notion de conception 79

2. NOUVELLE FORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE 80

2.1. Identification des conceptions des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification, de leurs modes de fonctionnement et de leurs origines possibles 80

2.2. Étude des logiques de réponses en fonction des situations et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique 81

3. MÉTHODOLOGIE 82

3.1. Méthodologie de recueil des données par questionnaire 82

3.2. Méthodologie d'analyse des conceptions dans le cadre d'une situation ouverte de classification 90

3.3. Méthodologie d'analyse de la relation entre les logiques de réponses et les types de classification 106

3.4. Synthèse de la méthodologie mise en œuvre 108

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION 110

4.1. Résultats concernant les conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification (QR1) 110

4.2. Résultats concernant la relation entre les logiques de réponses et les situations de classification (QR2) 138

5. CONCLUSION DE L'ENQUÊTE DIDACTIQUE 151

CHAPITRE 3 : ÉTUDE HISTORIQUE DE LA NATURE DU GROUPE DES VÉGÉTAUX DANS LA SYSTÉMATIQUE DU VIVANT 157

1. REFORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE À LA LUEUR DES RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE DIDACTIQUE 159

1.1. Bilan de l'enquête didactique, source de questions posées à la sphère historique 159

1.2. Nouvelle formulation des questions de recherche 162

2. LES CHANGEMENTS TAXONOMIQUES SUCCESSIFS ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA NATURE DU GROUPE DES VÉGÉTAUX 163

2.1. Le problème de la place des unicellulaires dans la classification : la fin du système à deux règnes du vivant 163

2.2. Le problème de l'importance accordée aux modes de nutrition : un cinquième règne du vivant 190

2.3. Conclusion relative à l'évolution du groupe des végétaux dans la systématique du vivant 232

3. LES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES ET LEUR INFLUENCE DANS LA SYSTÉMATIQUE 239

3.1. La pensée catégorielle 239

3.2. Le macrocentrisme 241

3.3. Le gradisme 242

3.4. L'essentialisme 247

4. CONCLUSION DE L'ÉTUDE HISTORIQUE 261

CHAPITRE 4 : RECONSTRUCTION DIDACTIQUE FONDÉE SUR L'HISTOIRE DES SCIENCES ET DES ARTICLES SCIENTIFIQUES 265

1. CADRE THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE DE L'EXPÉRIMENTATION DIDACTIQUE 268

1.1. Cadre méthodologique de notre reconstruction didactique : ingénierie didactique ou situation forcée ? 268

1.2. Utilisation de la littérature scientifique primaire dans la reconstruction didactique 272

1.3. Réalisation de cartes conceptuelles 274

2. QUESTIONS DE RECHERCHE 281

2.1. Recherche de significations : étude des raisonnements et de l'image de la nature de la science des étudiants 282

2.2. Recherche de faisabilités : évaluation de certains choix didactiques et détermination de possibles didactiques 283

2.3. Recherche méthodologique : la réalisation de carte conceptuelle comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation 283

3. PRÉSENTATION DE LA RECONSTRUCTION DIDACTIQUE ET JUSTIFICATION DES CHOIX 285

3.1. Choix des articles 285

3.2. La reconstruction didactique 292

4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE 304

4.1. Méthodologie relative aux questions de recherche de significations (QR1) 304

4.2. Méthodologie relative aux questions de recherche de faisabilités (QR2) 316

4.3. Méthodologie relative aux questions de recherche sur l'utilisation des cartes conceptuelles (QR3) 317

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION 323

5.1. Analyse des réponses au questionnaire préliminaire 323

5.2. Étude des raisonnements et de l'image de nature de la science des étudiants (QR1) 324

5.3. Évaluation des choix didactiques et détermination de possibles didactiques (QR2) 374

5.4. La réalisation de cartes conceptuelles comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation (QR3) 385

6. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR NOTRE RECONSTRUCTION DIDACTIQUE 424

6.1. Conclusion sur l'étude du raisonnement et l'image de la nature de la science des étudiants 424

6.2. Conclusion sur les choix didactiques de la séquence 432

6.3. Conclusion sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche 438

CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE 443

1. DISCUSSION THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE 444

1.1. Les relations entre didactique et histoire des sciences 444

1.2. La problématisation dans notre reconstruction didactique 450

1.3. Les méthodologies qualitatives et quantitatives en didactique 452

2. DISCUSSION SUR LE RAISONNEMENT DES ÉTUDIANTS CONCERNANT LE GROUPE DES VÉGÉTAUX ET LES CLASSIFICATIONS BIOLOGIQUES 455

2.1. De l'enquête didactique sur les conceptions à la reconstruction didactique 455

2.2. Bilan sur les principaux modes de raisonnement pouvant faire obstacle 463

3. IMPLICATIONS POUR L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION 468

3.1. Une plus large portée des résultats de cette recherche à d'autres groupes biologiques 468

3.2. Implications didactiques de cette recherche 469

CONCLUSION 481

1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS MAJEURS 481

2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE 483

2.1. Étude des pratiques de formation universitaire et de leur impact 483

2.2. Étude au niveau de l'enseignement secondaire 484

2.3. Étude des relations entre histoire des sciences et enseignement 485

2.4. Étude utilisant les cartes conceptuelles 485

BIBLIOGRAPHIE 487

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX 504

1. TABLE DES FIGURES 504

2. TABLE DES TABLEAUX 509

ANNEXES 515

1. LE QUESTIONNAIRE 517

2. LA GRILLE DE CODAGE 527

3. ANALYSE DES TROIS ARTICLES PORTANT SUR LA SYSTÉMATIQUE DES EUCARYOTES (EN UTILISANT LA GRILLE DONNÉE AUX ÉTUDIANTS) 531

3.1. Analyse de l'article de Whittaker (1969) 531

3.2. Analyse de l'article de Cavalier-Smith (1981) 536

3.3. Analyse de l'article de Burki (2014) 542

4. DÉTAIL DE LA SÉANCE DE BIOLOGIE, AU CŒUR DE LA SÉQUENCE 547

5. DÉCOUPAGE DU DÉBAT COLLECTIF EN ÉPISODES 553

6. TRANSCRIPTION DES DEUX DÉBATS COLLECTIFS 555

6.1. Transcription du débat collectif – partie 1 555

6.2. Transcription du débat collectif– partie 2 (synthèse sur les trois classifications à visée phylogénétique) 580

7. LES CARTES CONCEPTUELLES 592

7.1. Carte du groupe A2 (Karima et Aude) 592

7.2. Carte du groupe A3 (Jonathan et Pierrik) 593

7.3. Carte du groupe A4 (Laurène et Thomas) 594

7.4. Carte du groupe A6 (Romina et Tiphaine) 595

7.5. Carte du groupe A7 (Manuella et Helena) 596

7.6. Carte du groupe A8 (Marina et Valentino) 597

7.7. carte du groupe B2 (Véronique et Evelyne) 598

7.8. Carte du groupe B3 (Marco, Max et Guy) 599

7.9. Carte du groupe B4 (Benoît et Valérie) 600

7.10. Carte du groupe B5 (Albane et John) 601

7.11. Carte du groupe B6 (Laureline et Marjo) 602

7.12. Carte du groupe B7 (Eric et Matthew) 603

7.13. Carte du groupe B8 (Caroline et Lara) 604

8. PROPOSITIONS DES TREIZE CARTES CONCEPTUELLES RELATIVES AUX TERMES DÉRIVANT DU NOYAU LEXICAL « PHYLOGEN » 605

9. ANALYSE DU DÉBAT RELATIF À LA DÉFINITION DES VÉGÉTAUX DANS L'ARTICLE DE CAVALIER-SMITH 606

10. ANALYSE DU DÉBAT RELATIF À LA DÉFINITION DES VÉGÉTAUX DANS L'ARTICLE DE BURKI (2014) 608

10.1. Débat interne au groupe 1 (phase préparatoire au débat collectif) 608

10.2. Débat collectif (épisode 23) 613

11. ANALYSE DES DIFFICULTÉS LIÉES À LA CLADISTIQUE 618

11.1. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le premier débat collectif concernant Burki 618

11.2. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le second débat collectif concernant Whittaker et Cavalier-Smith 619

12. PROPOSITIONS DES TREIZE CARTES CONCEPTUELLES RELATIVES AUX TERMES CONCERNANT L'ÉVOLUTION DES IDÉES 622

12.1. Propositions concernant les termes ou nœuds lexicaux theori/context/cadre 622

12.2. Propositions concernant les différentes méthodes de classification 624

13. TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES RELATIFS À LA CONSTRUCTION DE LA CARTE CONCEPTUELLE (GROUPE A7) 627

Une table des illustrations est proposée en page 504.

Introduction

Le terme « végétal » est l'objet de références quotidiennes que l'on évoque à l'occasion de discussions diverses sur l'agriculture, les marées vertes bretonnes, ou encore lors d'une promenade en forêt ou durant le jardinage dominical... Ce concept quotidien est fortement imprégné du sens commun, faisant des végétaux des organismes verts et immobiles.

Sur le plan scientifique, le développement de la biologie a engendré une diversité de questions et a rendu le concept de végétal fortement polysémique. Selon les disciplines biologiques, le terme « végétal » renvoie à une multiplicité de concepts, c'est-à-dire de constructions humaines répondant à des problèmes différents. Ainsi, le concept de végétal n'a pas la même signification selon le positionnement que l'on adopte : le point de vue de la systématique, interrogeant les liens de parenté au sein du vivant (phylogénie), le point de vue fonctionnel (biochimie, physiologie, écologie) ou encore le point de vue structural (biologie cellulaire, anatomie). Il ne réfère pas aux mêmes espèces.

Qualifier un être vivant ou un concept de végétal, qu'il s'agisse d'un groupe biologique ou d'un type de cellule, revient à mobiliser une classification du vivant. Or, il existe une grande diversité de classifications en science et plus particulièrement en biologie. Suivant l'objectif qui leur est assigné, les classifications biologiques répondent à un problème utilitaire, à un problème scientifique de nature fonctionnelle ou phylogénétique. Cette recherche se positionne à contre-pied du mythe de l'existence d'une classification unique du vivant « faisant référence pour tous les usages de la biologie » (Deleporte, 2005/2014, p. 81).

Polysémique et pris dans un réseau problématique, le concept de végétal nous apparaît particulièrement propice pour travailler en formation sur la diversité des classifications et leurs logiques spécifiques.

L'objet de notre recherche consiste en la mise en jeu d'une pensée complexe, pensée qui n'aplatit pas la diversité sémantique d'un concept scientifique, mais qui, au contraire, articule les différents registres explicatifs et les contextes problématiques. Nous ne nous attacherons pas à l'étude de la fonction unificatrice d'un concept scientifique mais à la polysémie du concept de végétal en relation avec la pluralité de classifications biologiques. Cette ambition apparaît orthogonale avec la volonté évidente de construire une définition univoque d'un concept s'appliquant en toute situation.

Notre travail se positionne dans le champ de la didactique des sciences de la vie et de la Terre (SVT) au niveau universitaire, un champ encore peu exploré en France. Il s'inscrit plus particulièrement dans le cadre de l'année de master durant laquelle les étudiants préparent le concours de recrutement de professeur de collège et de lycée. Notre recherche porte sur un public ayant étudié la biologie, durant quatre ou cinq années de formation universitaire, dans de nombreuses unités d'enseignement thématiques cloisonnées.

En premier lieu, cette thèse possède une visée compréhensive se situant sur trois plans complémentaires.

- Compréhension des conceptions des étudiants concernant le groupe des végétaux dans différentes situations de classification et la caractérisation des types de raisonnement classificatoires mis en jeu.
- Compréhension des raisons de l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux à travers l'histoire de la systématique du XIX^{e} siècle à nos jours.
- Compréhension des conditions de possibilité de l'utilisation didactique de l'histoire des sciences afin de travailler la polysémie du concept de végétal selon les classifications biologiques.

En raison des changements historiques importants qui concernent la systématique du vivant et de leurs conséquences sur le contour du groupe des végétaux, nous pensons que l'histoire des sciences pourrait constituer un levier didactique. Pour nous, la diversité des problèmes (Orange, 2000) mis au travail par les systèmes classificatoires successifs et la pluralité de caractères utilisés en systématique au cours des deux derniers siècles constituent des points d'appui pour la formation des enseignants.

L'idée que l'histoire et l'enseignement des sciences puissent s'éclairer mutuellement n'est pas nouvelle. Mais la dialectique épistémologique entre les enquêtes historique et didactique que nous cherchons à établir s'applique à un objet spécifique, un concept polysémique, et à un niveau de formation universitaire élevé permettant de questionner l'articulation entre différents registres explicatifs biologiques, les registres fonctionnel et phylogénétique.

La thèse se structure en cinq chapitres.

Le premier entend présenter les enjeux de la recherche. Pour ce faire, il convient tout d'abord de circonscrire notre sujet d'étude biologique, et, ensuite, d'envisager le cadre méthodologique de la reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences (de Hosson, 2011), cadre qui structure cette thèse et que nous adaptons à nos objectifs. Cela nous permettra d'esquisser une première formulation de nos questions de recherche.

Les trois chapitres qui lui succèdent développent trois enquêtes : l'enquête didactique sur les conceptions des étudiants qui forme le chapitre 2 ; l'étude de l'histoire du groupe des végétaux dans la systématique, le chapitre 3 ; enfin l'expérimentation nommée reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences, le chapitre 4.

Le cinquième et dernier chapitre consiste en une discussion générale. Cette discussion répond à la problématique de recherche élaborée au cours du premier chapitre en tissant des liens entre les principaux résultats. Elle présente également les limites puis les implications de ce travail au niveau de l'enseignement secondaire et universitaire.

Chapitre 1 : les enjeux de la recherche

1. UNITÉ ET DIVERSITÉ DES CLASSIFICATIONS 20

1.1. Importance des classifications dans la vie quotidienne et dans l'activité scientifique 21

1.2. La pluralité des classifications biologiques 23
1.2.1. Les classifications sont des concepts humains reposant sur des bases théoriques 23
1.2.2. Les classifications utilitaires répondent à des problèmes pragmatiques (technique et domestique) 26
1.2.3. Les classifications fonctionnelles et phylogénétiques répondent à des problèmes scientifiques distincts 27

2. LES VÉGÉTAUX : UN CONCEPT AUX MULTIPLES VISAGES 36

2.1. Les végétaux dans les classifications fonctionnelles 36

2.2. Les végétaux dans la classification phylogénétique actuelle 38

2.3. Les végétaux, un concept issu d'une histoire scientifique et sociale 41
2.3.1. Les différents sens accordés aux végétaux à travers l'histoire de la systématique 41
2.3.2. Les végétaux : histoire sociale et institutionnelle 42

2.4. Le concept de végétal selon les disciplines biologiques et les problèmes travaillés 48

3. LE PUBLIC ÉTUDIÉ 49

3.1. Les raisons du choix du public 49

3.2. Une recherche positionnée autour d'une réforme de la formation et du recrutement des enseignants 51

4. FÉCONDITÉ D'UNE APPROCHE HISTORIQUE AU NIVEAU DIDACTIQUE 52

4.1. L'histoire des sciences comme moyen d'éclairer les difficultés des apprenants 52

4.2. L'histoire des sciences comme source de problèmes féconds permettant d'élaborer un parcours d'apprentissage 53

4.3. L'histoire des sciences comme approche de la nature de la science 54

5. LE CADRE MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECONSTRUCTION DIDACTIQUE FONDÉE SUR L'HISTOIRE DES SCIENCES ET SON ADAPTATION À NOTRE RECHERCHE 56

5.1. Présentation du cadre méthodologique 56

5.2. Pourquoi mobiliser ce cadre méthodologique dans notre recherche ? 58

5.3. Adaptation du cadre à nos positionnements théoriques spécifiques et à nos objectifs 59
5.3.1. Importance accordée aux problèmes dans les apprentissages 59
5.3.2. Utilisation de la littérature scientifique primaire dans la reconstruction didactique 61
5.3.3. Une autre modélisation de la reconstruction didactique adaptée à nos objectifs 63

6. PROBLÉMATIQUE ET PREMIÈRE FORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE 65

6.1. Problématique de la thèse 65

6.2. Première formulation des questions de recherche 66
6.2.1. Questions de recherche concernant l'enquête didactique visant à déterminer le profil conceptuel des étudiants, futurs enseignants de SVT 67
6.2.2. Questions de recherche concernant l'étude historique 68
6.2.3. Questions de recherche concernant la reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques et des articles scientifiques 68

Ce premier chapitre a pour objectif la construction de la problématique de la recherche. Nous réaliserons tout d'abord une analyse du contenu en proposant un éclairage du sujet : les différentes classifications biologiques et l'exemple du groupe des végétaux dans sa multiplicité de significations.

Nous justifierons ensuite les raisons du choix du public étudié, à savoir des étudiants de master préparant le concours de recrutement de professeur de *sciences de la vie et de la Terre* (SVT). Cette recherche établissant un dialogue entre recherches didactique et historique, les différents usages de l'histoire des sciences en didactique relevés dans les travaux antérieurs seront présentés afin d'expliciter nos propres choix.

Enfin, nous présenterons le cadre méthodologique de la reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques (de Hosson, 2011) qui structure les trois phases de notre recherche. Nous expliquerons comment nous adapterons ce cadre à nos propres objectifs. Ces positionnements méthodologiques et théoriques permettront d'énoncer une première formulation des questions de recherche.

1. Unité et diversité des classifications

L'élaboration ou l'utilisation de classifications jouent un rôle essentiel dans la vie quotidienne et dans l'activité scientifique, particulièrement en biologie. Nous présenterons l'importance des classifications puis nous montrerons que les classifications biologiques sont diverses, même si elles présentent certaines caractéristiques communes et répondent à différents cahiers des charges qu'il conviendra de bien distinguer.

1.1. Importance des classifications dans la vie quotidienne et dans l'activité scientifique

Classer est une activité quotidienne permettant de faire face à la colossale diversité d'objets et de processus (Mayr & Bock, 2002; Reydon, 2013). Pour mettre en ordre cette diversité, nous classons par exemple les ouvrages dans une bibliothèque, les produits au supermarché ou encore les différents types d'activité tellurique : tremblement de terre, éruption volcanique, inondation, glissement de terrain, etc. Les classifications sont donc ubiquistes dans notre vie quotidienne parce qu'elles permettent d'appréhender et d'embrasser une diversité d'objet auxquels elles donnent une cohérence synthétique.

L'activité classificatoire est également au cœur de l'activité scientifique. Pour l'historien Alistair C. Crombie (1994), la classification (ou mise en ordre taxinomique[1]) constitue l'un des six styles fondamentaux de la pensée scientifique[2] de la science occidentale (Gayon, 2001; Hacking, 1992; Henderson, MacPherson, Osborne, & Wild, 2015). Le philosophe David Hull (1986, p. 163) considère que « la classification est l'un des aspects les plus fondamentaux de la science. Aucun scientifique n'y échappe : ou bien il doit établir une classification dans le domaine qu'il étudie, ou bien il utilise une classification élaborée par un autre. C'est bien parce qu'elle est fondamentale pour la science que la classification ne cesse de prêter à controverse ».

Henri Poincaré va jusqu'à considérer que la science elle-même est une classification, au sens d'un système de mise en relations, « une façon de rapprocher des faits que les apparences séparaient, bien qu'ils fussent liés par quelque parenté naturelle et cachée » (Poincaré, 1905, p. 265).

La classification des êtres vivants nous préoccupe depuis l'Antiquité. Pascal Tassy explique que : « Dans la pensée occidentale, Aristote [*4^e^ siècle avant notre ère*] a joué un rôle de pionnier : il a su expliciter les fondements d'une classification rationnelle des êtres vivants tout en construisant un système des animaux » (Tassy, 2005/2014, p. 100). D'après Jean Gayon (2001, p. 101), la classification a constitué, du XVI^e^ au XVIII^e^ siècle, une méthode dominante en histoire naturelle, ainsi d'ailleurs que l'enjeu d'âpres controverses.

[1] La taxonomie (ou taxinomie) est « la science des lois de la classification des formes vivantes. Science de la théorie et de la pratique de la classification (Mayr). D'un point de vue pratique, elle inclut la reconnaissance, l'identification des formes vivantes et leur rangement dans une classification. » Source : http://acces.ens-lyon.fr/biotic/evolut/parente/html/glossair.htm (G. Lecointre), consulté le 01/02/2016. P. Tassy (2003) précise que « par taxinomie on comprend ici la science des classifications selon la définition de son concepteur, A.-P. de Candolle en 1813, reprise notamment par Simpson (1961), et non la seule dénomination des espèces ».

[2] Les six styles d'enquête et de démonstration sont : « déduction à partir de principes, méthode expérimentale, construction de modèles analogiques, classification, analyse statistique, méthode de dérivation historique » (Gayon, 2001, p. 101).

Si le mode de raisonnement classificatoire reste très présent dans les sciences biologiques, il l'est également dans les autres disciplines qui catégorisent leurs objets d'étude. En médecine, les pathologies sont classées avec « pour but de distinguer et de séparer pour réduire la contagion et la mortalité » (Debru, 2009, p. 166). En chimie, la classification périodique regroupe les éléments chimiques selon le partage de caractéristiques atomiques et de propriétés réactionnelles (Reydon, 2013). En astronomie, les objets célestes se classent en différents groupes : étoile, planète, satellite, astéroïde, etc. La liste des exemples de classifications dans les différents champs disciplinaires est très étendue tant les classifications restent omniprésentes en science.

Cependant, certains auteurs proposent d'introduire une distinction entre les processus de classification et de catégorisation, marquant ainsi l'existence de différents degrés dans l'acte de classer. Ainsi Claude Debru (2009) définit la catégorisation comme « le regroupement d'objets en diverses catégories fondées chacune sur un critère particulier sans relations aux autres ».

Toute classification se constitue à partir de principes communs : l'établissement d'ensembles (qu'ils soient nommés classes, taxons ou groupes) selon des attributs partagés. Debru précise que « en général ces classes doivent être distinctes. Elles doivent reposer sur des discontinuités, et mieux les révéler » (2009, p. 170).

Les classes sont organisées le plus souvent de manière hiérarchique (Mayr, 1968), se traduisant par l'emboîtement de groupes. Afin de poursuivre l'exemple cité précédemment, la classe 'planètes' se subdivise en deux autres classes : 'planètes telluriques' et 'planètes gazeuses'. Claude Debru (2009) distingue les activités de création de classes et leur hiérarchisation, en reprenant une distinction proposée par Griffiths[3].

Si la plupart des classifications présente un emboîtement lié à l'existence de plusieurs niveaux hiérarchiques, il n'en est pas toujours ainsi. Ainsi une classification alphabétique dans une bibliothèque ne se traduit pas par un emboîtement. En biologie, certaines classifications ont été linéaires mettant en jeu une Échelle des Êtres, telle que celle de Charles Bonnet en 1745, dans un cadre de pensée fixiste.

De plus, le processus de classification revêt une dimension anthropologique. Comme l'indique Pascal Tassy, « il existe peut-être une capacité propre au cerveau humain d'appréhender la diversité des êtres vivants tout en l'ordonnant » (2005/2014, p. 99). Selon

[3] « La création des classes et la hiérarchisation des classes peuvent être considérées comme deux actes différents. Regrouper des éléments ou des individus dans des classes selon leurs ressemblances est une chose. Établir une hiérarchie de classes emboîtées les unes dans les autres selon différents degrés de généralité en est une autre. Cette opération consiste véritablement à créer une systématique » (Debru, 2009, p. 171)

Guillaume Lecointre, « pour des raisons pratiques, cognitives, mais aussi métaphysiques et religieuses, notre œil et notre cerveau repèrent d'abord ce qui semble stable » (Lecointre, 2012b, p. 27). Plusieurs recherches, e.g. Atran (1998), Ellen et Reason (1979), s'intéressent à la dimension contextuelle et culturelle des classifications populaires, étudiées selon une approche anthropologique. Pour l'anthropologue Scott Atran (1998), les humains de toutes cultures pensent la diversité des animaux et des plantes de manière élaborée. Les classifications populaires procurent une certaine compréhension du monde et sont ancrées culturellement et géographiquement[4].

Si les classifications ne sont pas spécifiques à la biologie, focalisons-nous à présent sur les différents types de classifications des êtres vivants, constituant l'objet principal d'étude de notre recherche.

1.2. La pluralité des classifications biologiques

Notre thèse se positionne à contre-pied du mythe de l'existence d'une classification unique du vivant. Nous entendons développer les grands types de classifications en biologie (principalement phylogénétique et fonctionnelle) et, en premier lieu, montrer qu'une classification reste une construction humaine élaborée dans un cadre théorique donné.

1.2.1. Les classifications sont des concepts humains reposant sur des bases théoriques

Une question vive a été l'objet de débats au cours du XVIII^e^ siècle : celui de l'opposition entre les classifications artificielle et naturelle des êtres vivants. Cette opposition nous semble importante à présenter succinctement. Nous proposons un bref historique qui permettra ensuite de nous questionner sur les fondements épistémologiques de la classification.

- **Classifications artificielle et naturelle**

Les XVII^e^ et XVIII^e^ siècles sont marqués par l'essor des « systèmes et méthodes », termes qualifiant les classifications de cette époque. La première méthode botanique définie sur la base de la forme de la fleur, du fruit, et sur le nombre des graines est attribuée à Andrea

[4] « Humans everywhere think about plants and animals in highly structured ways. (…) Structural aspects of folk taxonomy provide people in different cultures with the built-in constraints and flexibility that allow them to understand and respond appropriately to different cultural and ecological settings. Another set of reasoning experiments shows that Maya, American folk, and scientists use similarly structured taxonomies in somewhat different ways to extend their understanding of the world in the face of uncertainty » (Atran, 1998, p. 547).

Cesalpino en 1583[5]. Une méthode est « une classification utilisant à chaque subdivision le caractère « le plus répandu, le plus constant ou le plus commode », sans principe préalablement établi, le but recherché étant à la fois une présentation didactique et un regroupement effectif des plantes les plus ressemblantes » (Patrick, 1986, p. 55). Hervé Le Guyader (1986, p. 73) cite le célèbre botaniste Michel Adanson (1763) pour lequel « la méthode ne diffère du système que par l'idée que l'auteur attache à ses principes, en les regardant comme variables dans la méthode, et comme absolus dans le système ».

Soulignons deux références marquantes de ce type de classifications. Nous voulons parler de Joseph Pitton de Tournefort et Carl von Linné. Le premier élabore une « méthode nouvelle », basée sur la corolle de la fleur puis sur les fruits, qui sera publiée dans son ouvrage *Éléments de Botanique (1694)*. Sa classification eut un retentissement important et accorda un rôle central aux genres, subdivisés en espèces et rassemblés en classes. Pour Tournefort, « il doit exister un ordre sous-jacent tel que chaque plante a une place naturelle, déterminée par un caractère » (1986, p. 76). Carl von Linné (1707-1778), célèbre naturaliste suédois et grand botaniste, est connu notamment pour l'élaboration du premier code taxinomique avec en particulier la nomenclature binominale, faisant de lui le « législateur des sciences naturelles » (Duris, 2008, p. 33). La nomenclature binominale, en genre et espèce, est encore utilisée aujourd'hui. La classification des plantes à fleurs qu'il propose est connue comme le « système sexuel », basé sur la structure florale (Linné, 1737). Le Guyader (id.) explique que « Linné, tout en rêvant d'une classification naturelle [*reflétant l'ordre de la nature*], a réalisé un système artificiel qui, étant donné sa simplicité, a connu un gigantesque succès. » Linné connaissait de nombreux détracteurs, dont Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), intendant du jardin du roi à Paris. Michel Adanson (1727-1806) est aussi l'un de ses plus virulents détracteurs. Fort de ses séjours en forêt tropicale, Adanson pris conscience de l'incapacité du système linnéen à rendre compte de la diversité de la flore locale.

L'utilisation d'un critère est jugée arbitraire par les détracteurs, dénonçant le caractère artificiel des classifications développées. L'objectif était alors de proposer une classification naturelle, reflétant l'acte unique de Création dans un cadre de pensée alors fixiste. En réaction, il va se développer des classifications fondées sur un ensemble des caractères. Une polémique oppose les tenants de la hiérarchisation, ou subordination, des caractères « pour tenir compte de la valeur de l'information utile qu'ils sont supposés contenir (Jussieu) » et

[5] À l'Antiquité, Théophraste (371-288 av. JC), élève d'Aristote, a élaboré une classification botanique distinguant quatre groupes morphologiques : arbres, arbustes, sous-arbrisseaux et herbes. Il est considéré comme fondateur de la botanique.

ceux qui pensent ne devoir « apporter aucune pondération » (1986, p. 57) comme Adanson. Cependant, ce dernier « va sombrer dans un semi-oubli plein de déférence » (Ibid., p. 58). C'est donc sur les bases de la « méthode naturelle » d'Antoine-Laurent de Jussieu que le célèbre botaniste suisse Augustin Pyramus de Candolle (1778-1841) va édifier sa classification au début du XIX^{e} siècle.

C'est durant le XIX^{e} siècle que va s'asseoir l'idée d'évolution des espèces, bouleversant le regard porté sur la diversité du vivant et les classifications. Ainsi pour Linné et ses contemporains créationnistes, la classification naturelle devait retracer l'ordre divin de la Création. Dans un cadre de pensée évolutionniste, la recherche d'une classification naturelle revient à chercher à déterminer les relations de parenté entre les espèces. Les controverses concernant la façon de classer dans un cadre évolutionniste ont marqué l'histoire du XX^{e} siècle mais nous reviendrons ultérieurement sur les débats entre la méthode phénétique, héritée de l'approche d'Adanson, la systématique évolutionniste, développée autour de la théorie synthétique de l'évolution et la systématique phylogénétique (ou cladistique) développée durant la seconde moitié du XX^{e} siècle.

S'il n'y a bien qu'une seule histoire du vivant, peut-on envisager d'élaborer une classification phylogénétique qui en soit l'exact reflet ? Cette question revient à interroger sur un plan épistémologique le rapport entre le réel et les savoirs scientifiques. Autrement dit, les classifications sont-elles le reflet d'un ordre naturel ou bien le fruit d'une construction humaine ?

- **Classifications et choix théoriques**

Pierre Deleporte explique que : « une erreur philosophique classique du positivisme logique (Rieppel, 2005/2014) consistait à considérer que les caractéristiques des objets réels nous sont « données » de manière évidente, directement par les sens » (Deleporte, 2005/2014, p. 70). Ce positionnement est celui « des partisans de l'existence de classes évidentes », qui « considèrent qu'un ordre naturel est donné à contempler » (Ibid., p. 73). Il s'oppose à un positionnement philosophique rationaliste de l'activité scientifique pour lequel la biodiversité est « un grand désordre qu'il faut ordonner par nous-mêmes en essayant de l'expliquer. Ceci n'est faisable que dans un cadre théorique donné, qui dictera les raisons et les règles de la mise en ordre » (Ibid., p. 73). Ainsi établir une classification scientifique implique de faire des

choix qui justifient la nature des caractères ou propriétés utilisés pour établir des regroupements[6].

Denise Orange-Ravachol (2007, p. 56) ajoute que « les critères de classification ne sont pas « donnés », autrement dit portés à la manière d'étiquettes par les êtres vivants : leur détermination/construction participe à toute élaboration classificatoire ».

Les classifications sont des concepts humains pouvant être conçues de différentes manières. Le lien qui unit un type de classification avec son cahier des charges correspond à l'usage que l'on veut en faire[7].

D'autres auteurs, comme E. Mayr et W.J. Bock (2002), explicitent également la diversité des classifications existant en biologie, chaque discipline classant ses objets d'étude, qu'il s'agisse des communautés, des organes, des tissus ou des cellules. Ainsi toutes les classifications biologiques ne sont pas évolutives.

> « In biology, classifications exist of living organisms, but also of organ, cell and tissue types of diverse organisms, of ecological communities, etc. **These classifications are not all of the same type; hence, 'biological classification' is not a single concept**. Not all biological classifications are evolutionary classifications of organisms, as is all too often erroneously assumed by biologists and philosophers alike » (Ibid., p. 170), *c'est nous qui soulignons*.

Présentons plus avant les principaux types de classification des êtres vivants en relation avec leur cahier des charges respectifs et les problèmes auxquels ils cherchent à répondre. En effet, « pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question » (Bachelard, 1938/1993, p. 14).

1.2.2. Les classifications utilitaires répondent à des problèmes pragmatiques (technique et domestique)

Sur le plan historique, les premières classifications sont de type utilitaire (Lecointre & Le Guyader, 2001). Les classifications utilitaires visent à répondre à des problèmes pragmatiques (comment faire ?) de type technique et domestique : comment ne pas confondre une plante

[6] « (…) nous pouvons concevoir de manière réaliste ce que nous faisons quand nous définissons des taxons : nous n'observons pas une réalité matérielle évidente qui s'imposerait à nous comme un système concret, nous classons, tout simplement. Nous classons, c'est-à-dire que nous regroupons conceptuellement des individus ou objets dans une même classe, parce qu'ils partagent au moins une propriété commune. **Il nous revient de décider des propriétés pertinentes, et nous devons justifier ces choix dans un contexte scientifique si nous voulons éviter l'arbitraire** » (Deleporte, 2005/2014, p. 74), *c'est nous qui soulignons.*

[7] « Les classes et les classifications sont des concepts humains, et non pas des entités matérielles « naturellement » cohérentes (et donc encore moins des « individus »). Cela ne veut pas dire qu'ils soient forcément dénués de sens ou inutiles. Mais on peut les concevoir de **différentes manières**, **avec des significations différentes selon les contextes théoriques dans lesquels on les élabore et l'utilisation que l'on veut en faire**. Une classification sensée repose nécessairement sur des **bases théoriques.** Une classification utile optimale doit répondre au **cahier des charges correspondant à l'usage particulier** que l'on veut en faire. La classification unique, « naturelle », évidente et d'usage universel est un mythe » (Deleporte, 2005/2014, p. 67), *c'est nous qui soulignons*.

médicinale avec une plante toxique par exemple. G. Lecointre et H. Le Guyader (2001) expliquent qu'elles ont été particulièrement développées en botanique, tant est grande la diversité des plantes d'intérêt ou au contraire dangereuses. À la suite de ces auteurs, citons la classification proposée par le grec Dioscoride (vers 40-90 après J.-C.) qui distingue cinq groupes de plantes : les plantes alimentaires, médicinales, aromatiques, vineuses et vénéneuses. La dimension utilitaire est évidente puisque les critères de classification sont relatifs à l'utilisation des plantes : alimentation, soin, etc. De nos jours, d'autres classifications existent pour classer les plantes par rapport à leur utilisation agricole et au mode de culture, distinguant par exemple les céréales, les plantes sarclées, les oléagineux, les protéagineux, les fruitiers ; et les adventices de culture. Nous laissons volontairement de côté ce type de classification pour nous focaliser sur les classifications fonctionnelles et phylogénétiques.

1.2.3. Les classifications fonctionnelles et phylogénétiques répondent à des problèmes scientifiques distincts

D'autres classifications répondent quant à elles à des problèmes scientifiques. Il s'agit des classifications fonctionnelles et phylogénétiques. Elles sont explicatives au sens de S.E. Toulmin (1961) et K.R. Popper. S. Toulmin précise que « la science est principalement un effort pour comprendre ; elle désire rendre le cours de la nature non simplement prévisible mais intelligible » (1973, p. 113-114). K.R. Popper ajoute que « le but de la science, c'est de découvrir des explications satisfaisantes de tout ce qui nous étonne et paraît nécessiter une explication » (1998, p. 297).

Nous partageons la position de D. Orange-Ravachol pour qui « construire une classification scientifique, c'est donc s'installer dans une explication du monde vivant » (2007, p. 53). Les deux approches fonctionnelles et phylogénétiques de la classification du vivant sont liées aux deux dimensions distinctes et cependant complémentaires de la biologie (Mayr, 1982/1989, p. 111, 1998, p. 129), qui est à la fois une science fonctionnaliste et une science historique. La première cherche à comprendre le fonctionnement des êtres vivants, la seconde cherche à comprendre l'histoire évolutive des organismes.

- **Une classification fonctionnelle répond à un problème fonctionnel**

Une classification fonctionnelle regroupe des espèces partageant une même fonction. Il peut s'agir de différentes fonctions, comme la nutrition : organismes autotrophes ou hétérotrophes, animaux microphages, herbivores, prédateurs, etc. ; la reproduction : végétaux se disséminant

par des spores ou par des graines, animaux ovipares ou vivipares. Ces classifications fonctionnelles sont nombreuses en biologie car chaque domaine classe ses propres sujets d'étude[8].

En écologie, les classifications permettent de penser les relations de nature fonctionnelle entre les êtres vivants, notamment par rapport à leur rôle dans les cycles de la matière. Il existe de nombreuses classifications fonctionnelles écologiques. Ainsi la classification de Raunkiaer en 1904 distingue différents groupes de végétaux selon la position des organes de pérennance pendant l'hiver : phanérophytes, chamaephytes, hémicryptophytes, etc. D'autre part, les plantes sont classées écologiquement selon leur degré de dépendance à l'eau en relation avec les conditions hydriques de leur milieu de vie : hydrophytes, mésophytes, xérophytes. Il ne s'agit là que de quelques exemples de classification fonctionnelle.

- **Une classification phylogénétique répond à un problème historique**

Une classification phylogénétique[9] répond, quant à elle, à un problème historique, c'est-à-dire lié à l'histoire du vivant. Elle s'inscrit dans le paradigme évolutif construit à partir des travaux de Charles Darwin (1859). Ce type de classification se construit en rupture avec les classifications établies dans un cadre fixiste et créationniste, ce dernier cherchant à retracer l'ordre divin de la Création, comme nous l'avons expliqué précédemment. Dans le cadre de la pensée phylogénétique, il s'agit d'un tout autre cahier des charges qui doit répondre au problème suivant : quel taxon est le plus proche de quel autre sur le plan de l'histoire évolutive ?

Un groupe phylogénétique valide est monophylétique : il rassemble des espèces apparentées ainsi qu'un ancêtre commun exclusif. C'est ce principe qui fonde théoriquement la façon de concevoir actuellement la construction des classifications phylogénétiques et qui se traduit schématiquement par des représentations sous forme d'arbre phylogénétique.

[8] « Biology consists of a considerable number of specialized fields, each of which have their own specific subject matter (ranging from the very small to the very large and including genes, gene networks, cells, organelles, organismal parts and structures, organisms, populations, metapopulations, biomes and ecosystems), their own specific aims and their own specific methodologies. **Often they use their own ways of classifying their subject matter** » (2013, p. 190), *c'est nous qui soulignons*.

[9] Nous utilisons ici l'expression « classification phylogénétique » plutôt que « classification évolutive », le terme « phylogénie » étant proposé par E. Haeckel en 1866. Plus récemment, dans un cadre hennigien, la distinction entre classifications phylogénétique et évolutive marque le rejet des groupes paraphylétiques (Ruggiero et al., 2015, p. 2). Nous présenterons la controverse entre la cladistique (ou systématique phylogénétique) et la systématique évolutionniste dans la prochaine section.

➢ Le concept d'homologie et ses différents usages selon les méthodes classificatoires

Regrouper des organismes partageant une même origine évolutive nécessite de ne pas prendre en compte toutes ressemblances, mais celles héritées d'un ancêtre commun : les homologies. Le concept d'homologie est essentiel dans l'approche phylogénétique, mais lui est antérieur. En effet, Stéphane Schmitt explique que l'homologie est employée implicitement depuis l'Antiquité mais n'a été définie avec précision qu'à partir du XIX^e^ siècle (Schmitt, 2006, p. 221). L'homologie désigne dans un premier temps une ressemblance structurale : il s'agit de l'homologie de position.

> « Geoffroy Saint Hilaire [*1772-1844*] joue un rôle primordial en formulant la notion « d'analogie » pour désigner justement la relation entre des organes d'individus différents présentant des similitudes morphologiques profondes, indépendamment de leur fonction qui peut être tout à fait différente (il s'agit de « l'homologie » au sens moderne). Il est le premier, en outre, à énoncer clairement un critère permettant de reconnaître ces « analogues » [*au sens d'homologues*] : le **principe des connexions**, selon lequel des parties « analogues » présente les mêmes relations anatomiques, respectivement, avec les organes qui les entourent dans chacun des animaux considérés. » (Ibid., p. 221). « La distinction est donc très clairement reconnue dans les années 1840, et c'est au Britannique **Owen** qu'il va revenir de fixer à peu à peu définitivement l'usage terminologique en définissant l'analogie [*comme une ressemblance fonctionnelle*] et l'homologie [*comme une ressemblance structurale*] » (Schmitt, 2006, p. 223, c'est nous qui soulignons).

Plus tard, avec le concept darwinien de « descendance avec modification », l'homologie prend le sens de caractère hérité d'un ancêtre commun. Il s'agit alors de l'homologie de filiation. Les deux concepts sont en relation, puisque l'ascendance commune des deux espèces explique leur ressemblance structurale. Guillaume Lecointre le formule ainsi : « répétons-le, ce qui est à expliquer, ce sont les similitudes entre attributs. Ce qui explique, c'est la phylogenèse, car elle fait office de loi explicative » (Lecointre, 2004, p. 11).

Trois écoles se sont affrontées dans la seconde moitié du XX^e^ siècle en systématique[10] : la nouvelle systématique (ou systématique évolutionniste), la phénétique (ou taxonomie numérique) et la systématique phylogénétique (ou cladistique, tirant son nom du grec *klados*, branche). Armand de Ricqlès et Kevin Padian résument cette tension de façon très synthétique.

[10] La systématique est « la science des classifications biologiques et des relations évolutives entre organismes ; l'étude scientifique des différents organismes dans leur diversité et leurs relations (Simpson, sous entendu relations phylogénétiques). » Source : http://acces.ens-lyon.fr/biotic/evolut/parente/html/glossair.htm (G. Lecointre), consulté le 01/02/2016. Taxonomie et systématique sont souvent confondues. La discussion des différences entre ces deux termes est menée par Stuessy (2009, p. 5-8). Pour de nombreux auteurs, la systématique a un sens plus vaste, puisqu'elle inclut les mécanismes évolutifs expliquant les relations évolutives entre taxons.

> « Du point de vue de la reconstitution des résultats concrets de l'évolution, ou « patterns phylogénétiques », les années 1970–1990 ont constitué une période révolutionnaire et particulièrement stimulante. La « **nouvelle systématique** » d'Huxley (1958), Mayr (1969) et Simpson (1961) partie intégrante de la synthèse orthodoxe[11], se voulait résolument évolutionniste, mais ses outils et procédures dérivaient très largement de la systématique classique, dont les racines linnéennes étaient pré-évolutionnistes. À partir de la décennie 1970, cette systématique « synthétiste » s'est trouvée vigoureusement contestée par deux courants opposés : d'une part, la **taxonomie numérique**, approche quantifiée fondée sur l'usage de l'informatique (Sneath & Sokal, 1963) et d'autre part, la **systématique phylogénétique ou cladisme** (Hennig, 1966). Cette dernière, explicitement évolutionniste dans ses intentions initiales, prenait en compte toutes les conséquences pratiques de l'adage darwinien, selon lequel « les classifications deviendront des généalogies » (Padian, 2004). Il en est découlé une remise en cause radicale des concepts, méthodes et procédures en systématique (Tassy, 2005). » (de Ricqlès & Padian, 2009, p. 356), *c'est nous qui soulignons*.

La nouvelle systématique (ou systématique évolutionniste) cherche « à prendre en considération tous les aspects et facteurs de l'évolution, y compris les degrés de divergence et l'écologie » (Debru, 2009, p. 182). Pascal Tassy explique qu'elle « fit d'une part l'économie d'une réflexion moderne sur l'homologie et, d'autre part privilégia la conception de grades évolutifs, regroupant des organismes partageant une même zone adaptative (concepts flous et non testables) censés représenter l'évolution à grande échelle » (Tassy, 2003). Cette école de systématique considère comme valide des grades, c'est-à-dire des taxons partageant un même niveau évolutif et adaptatif, un même degré de complexité. Cette systématique a été remise en cause et « prise en tenaille » par deux autres façons d'appréhender la classification.

La taxonomie numérique ou phénétique prend en compte la ressemblance globale, à la suite d'Adanson deux siècles auparavant. « L'utilisation des ordinateurs encouragea cette démarche qui utilisait diverses méthodes mathématiques (calculs d'indice de similitude et établissement d'une matrice de distances aboutissant à un phénogramme). Cette recherche se fait sans intégrer la notion d'homologie, en admettant que l'histoire évolutive est exprimée par la similitude globale » (Barriel, 2009, p. 210).

La cladistique, appelée également systématique phylogénétique, a entraîné un renouveau important en systématique. L'entomologiste allemand Willi Hennig (1950, 1965, 1966) en est le fondateur. Pour W. Hennig, il n'y a aucune corrélation stricte entre similarité d'ensemble et relation phylogénétique. La systématique doit reposer sur le choix approprié et l'estimation de l'importance de caractères pertinents, précise C. Debru (2009, p. 185). Aussi, W. Hennig

[11] La synthèse orthodoxe désigne la théorie synthétique de l'évolution, spécialement dans ses aspects et formulations « orthodoxes » (circa-1940–1970), intégrant de nombreux apports disciplinaires (cf. chapitre 3).

propose une redéfinition du concept d'homologie, en introduisant la notion d'état de caractère (ancestral ou dérivé) qui reste centrale dans la méthode cladistique. « Seul le partage par différentes espèces de caractères dont l'état est transformé (synapomorphie) est signe d'une parenté étroite : c'est la ressemblance due à une ascendance commune. Au contraire, les caractères restés à l'état primitif (symplésiomorphie) ne témoignent pas d'une parenté [étroite et exclusive]» (Tassy, 1991/1998, p. 74). Déterminer l'état ancestral et l'état dérivé implique de polariser un caractère, c'est-à-dire déterminer la séquence de transformation d'un caractère au cours de l'évolution. Pour se faire, le recours à un extra-groupe, une référence externe à la collection à classer mais proche parent au vu des connaissances disponibles, permet de déterminer l'état ancestral du caractère, qui est l'état présent dans l'extra-groupe.

G. Lecointre synthétise ainsi l'apport méthodologique de W. Hennig.

> « Pour Hennig, la recherche des degrés relatifs d'apparentement ne peut se faire que sur un échantillon donné d'espèces. Dès lors, les êtres vivants se comportent comme des **mosaïques de traits** qui sont, pour certains, des signatures potentielles d'apparentement entre certains des membres de l'échantillon d'espèces à classer (et donc des marqueurs intéressants pour répondre à la question « Qui est plus apparenté à qui ? » : les futures « synapomorphies », états dérivés partagés), pour d'autres des traits trop généralement partagés pour la collection d'espèces que nous avons en mains (les futures symplésiomorphies), pour d'autres encore des traits trompeurs (les futures homoplasies) parce qu'ils auraient pu résulter d'évolutions convergentes (donc la ressemblance n'est pas ici héritée d'un ancêtre commun) ou parce que leur distribution ne résulte pas d'une acquisition ancestrale mais d'une disparition secondaire du trait dans une partie de l'échantillon. Pour assigner les traits ressemblants choisis à ces différentes catégories de traits, **il va falloir construire un arbre dont la forme des branches va apporter les réponses aux questions** » (Lecointre, 2009a, p. 283), *c'est nous qui soulignons.*

Ainsi la cladistique est une méthode de classification permettant de tester des hypothèses d'homologie. Au cours de la démarche, une homologie supposée est dite primaire. Après construction des arbres possibles et sélection de l'arbre le plus parcimonieux, les caractères sont réexaminés. Les hypothèses confirmées par l'analyse phylogénétique sont qualifiées d'homologie secondaire. D'autres hypothèses sont infirmées et, alors, sont qualifiées d'homoplasies ne témoignant pas d'une ascendance commune. La cladistique rejette les grades (ou groupes paraphylétiques) pour n'accepter et ne nommer que les clades (ou groupes monophylétiques). En effet, les grades ne comprennent pas tous les descendants d'une espèce ancestrale, mais seulement certains d'entre eux. Les grades excluent les espèces qui ont extrêmement divergé par l'acquisition de nouveaux états de caractères. Citons au sein du groupe des Embryophytes (plantes terrestres) les grades des « bryophytes » (s.l.) et des

« ptéridophytes » (figure 1). Ces groupes n'ont pas de validité pour la cladistique car ils restent incomplets en excluant certains descendants d'une lignée phylogénétique donnée. Traditionnellement, les bryophytes (s.l.) rassemblaient les hépatiques (Marchantiophytes), les mousses et sphaignes (Bryophytes s.s.) et les anthocérotes (Anthocérotophytes). Ces trois lignées étaient réunies sur la base du partage de caractères à l'état ancestral (symplésiomorphies)[12], acquises chez l'ancêtre commun de toutes les Embryophytes, comme la présence d'un embryon pluricellulaire nourri par l'organisme maternel, la présence d'une cuticule, la dépendance du sporophyte par rapport au gamétophyte, etc. Les bryophytes (s.l.) excluaient les plantes vasculaires (Trachéophytes) divergeant fortement par l'acquisition d'un système conducteur de sève, possédant des trachéides. Pourtant, l'ancêtre commun des trois lignées de bryophytes (s.l.) est également l'ancêtre des Trachéophytes. Il en est de même pour le groupe des ptéridophytes qui incluait les fougères, les prêles, les sélaginelles. Il était défini sur la base de caractères à l'état ancestral, hérités de l'ancêtre commun de tous Trachéophytes, et excluaient les Spermatophytes, ceux-ci ayant divergé par l'acquisition d'un ovule. G. Lecointre explique que « les grades sont de véritables marchepieds, les nouveaux barreaux d'une échelle des êtres larvée, parce que devenue évolutionniste » (2009a, p. 322). Aussi les ptéridophytes n'existent que parce que certains d'entre eux donnèrent un jour naissance aux Spermatophytes (plantes à ovule).

[12] Notons que la notion d'état de caractère est relative à une collection d'espèces. La présence d'une cuticule est un état dérivé (une synapomorphie) pour le groupe des Embryophytes, mais il s'agit d'un état ancestral (symplésiomorphie) pour une des lignées d'Embryophytes (les bryophytes s.s. par exemple).

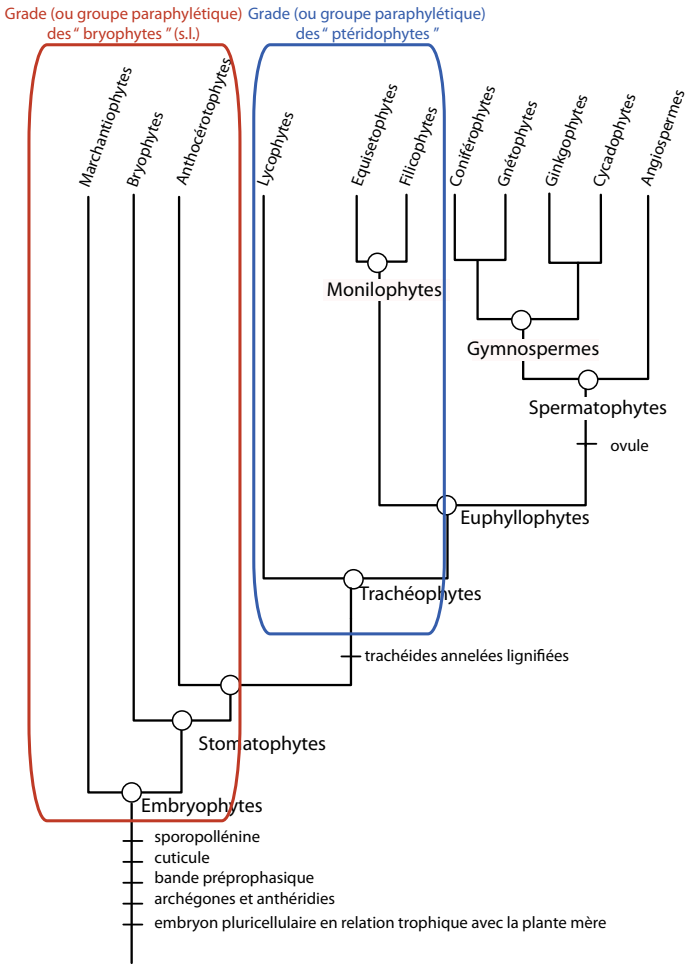


Figure 1 : le concept de grade (ou groupe paraphylétique) illustré à partir de deux exemples.
D'après Meyer, Reeb & Bosdeveix, 2008. Certains groupes ont été omis de la phylogénie par souci de simplicité (e.g. Psilophytes)

Le débat entre ces différentes méthodes de classification fut vif dans les années 1970, mais il semble aujourd'hui nettement apaisé, la systématique évolutionniste semblant un épisode presque révolu de l'histoire de la taxonomie. À la marge, il reste cependant quelques défenseurs de l'idée de conserver les groupes paraphylétiques, comme l'attestent certains échanges controversés récents dans la revue Cladistics (Schmidt-Lebuhn, 2014; Stuessy & Hörandl, 2014). Mais, bien que différemment, les débats concernant les méthodes de classifications se poursuivent. Pascal Tassy explique, en 2003, que les modèles d'évolution se développent activement et sont utilisés pour élaborer des arbres phylogénétiques sur des fondements probabilistes[13].

[13] « Dorénavant, les débats se concentrent sur le **poids des modèles évolutifs** dans la construction des arbres et des classifications qui en résultent (Darlu, 1999). Ce débat revêt un double aspect, un aspect conceptuel et un aspect disciplinaire. Aspect conceptuel : qu'entend-on par modèle évolutif et, par voie de conséquence, les méthodes probabilistes vont-elles supplanter l'approche cladistique [*basée sur l'analyse de parcimonie, cherchant à obtenir l'arbre dit "le plus court", c'est-à-dire nécessitant le moins de changements évolutifs*] ? (…) Une telle approche, qui se fonde sur des **modèles probabilistes de changement évolutif**, approches dites de maximum de vraisemblance ou baysienne, sont en plein essor en biologie moléculaire. Les utilisateurs de telles

Ces quelques éléments d'histoire des méthodes de classifications n'embrassent pas toute la richesse et la complexité[14]. Ils fournissent des clés de lecture pour l'analyse de l'histoire du groupe des végétaux dans le chapitre 3 de la thèse, particulièrement dédié à l'analyse historique.

En conclusion, il apparaît que le concept d'homologie reste central pour classer dans le but d'analyser les relations phylogénétiques. Toutefois, son usage diffère selon les méthodes classificatoires. La systématique évolutionniste, acceptant les grades, faisait un usage de l'homologie sans polarisation, c'est-à-dire sans distinguer les états ancestraux et dérivés des caractères. La phénétique a abandonné le recours au concept d'homologie au profit de la celui de similitude globale. La cladistique a provoqué un renouveau important en proposant un nouvel usage de l'homologie qui aboutit à rejeter les groupes paraphylétiques, basés sur le partage de caractère à l'état ancestral (symplésiomorphies), pour ne retenir que les groupes monophylétiques fondés sur le partage de caractères à l'état dérivé (synapomorphies).

- **Une classification phylogénétique est une théorie scientifique**

La construction d'une classification ne relève pas simplement d'une approche empirique. E. Mayr (1968, p. 546) précise qu'elle relève d'une théorie scientifique. « Every biological [*phylogenetic*] classification is a scientific theory. Classifications have the same properties as all theories in science ». C. Debru détaille les raisons avancées par Mayr, accordant aux classifications trois valeurs des théories scientifiques, qui sont explicatives, prédictives et heuristiques.

> « "En premier lieu, elle possède une valeur **explicative**, en élucidant les raisons des attributs conjoint est taxa, des lacunes qui les séparent, et des hiérarchie des catégories. […] La seconde propriété d'une bonne classification est de posséder une valeur **prédictive** élevée. Le programme génétique commun caractéristique des membres d'un taxon naturel garantie avec une probabilité élevée que tous les membres de ce taxon partagent certaines caractéristiques." (Mayr, 1969, p. 79) En tant que théorie, une classification évolutionniste possède également une valeur **heuristique** : elle "stimule les efforts pour reconnaître les structures homologues et pour tester la concordance de divers types de caractères" (Ibid., p. 80). Explicatives, prédictives et heuristiques, les classifications biologiques ont en commun avec les théories scientifiques d'être provisoires » (2009, p. 172-173), *c'est nous qui soulignons*.

méthodes soutiennent souvent que le modèle parcimonieux n'est pas réaliste et que l'évolution n'a certainement pas minimisé l'homoplasie (par exemple Hall, 2001). Un tel raisonnement signifie que **l'homologie n'est concevable qu'en termes de probabilité (approches probabilistes) et pas seulement en termes d'hypothèse** (approche hypothético-déductive, cladistique). Ce débat est pour la décennie présente : il est signe que la renaissance de la systématique est une réalité » (2003), *c'est nous qui soulignons*.

[14] L'article de Fisler et Lecointre (2013) propose une analyse originale de l'histoire des classifications entre 1766 et 1991, en élaborant un arbre des arbres.

Il nous semble que la valeur explicative est à relier avec la dimension rétrodictive d'une classification phylogénétique. Expliquer, c'est remonter le temps pour comprendre l'évolution des traits des organismes. En effet, l'arbre phylogénétique traduit non seulement les degrés relatifs d'apparentement des espèces par l'emboîtement de leurs attributs partagés, mais il raconte également le déroulement historique de l'apparition de ces derniers, c'est-à-dire l'ordre relatif de leur acquisition et de leurs changements d'état. La classification phylogénétique rend compte d'une histoire argumentée et réfutable ; elle permet la construction d'une microthéorie (Lecointre, 2004, 2009a, 2009b)[15]. Comme pour toute théorie scientifique, G. Lecointre met en avant l'importance de la cohérence interne de l'arbre.

En conclusion, les classifications biologiques représentent des constructions humaines plurielles, certaines utilitaires, d'autres de nature scientifique, qu'elles soient fonctionnelles ou phylogénétique. Elles correspondent à des systèmes cohérents d'explication du monde vivant. La classification phylogénétique est celle dont on parle implicitement lorsque nous utilisons le singulier pour désigner « la » classification biologique. Elle constitue une classification spécifique à la biologie puisque liée à l'histoire évolutive du vivant. La recherche d'une unique classification du vivant est un mythe qui gomme la diversité des problèmes biologiques auxquelles la pluralité des classifications répond, et qui aplatit les spécificités des caractères utilisés et des logiques propres à chacune.

Notre recherche questionne la pluralité des classifications en se focalisant spécifiquement sur le groupe biologique des végétaux. Nous entendons à présent expliquer en quoi l'exemple des végétaux nous paraît particulièrement adapté pour mettre en tension les différents systèmes de classification.

[15] « Pour un jeu donné de caractères, il existe un nombre très grand d'arbres possibles, de cohérences variables quant à la contiguïté des attributs semblables qu'ils impliquent. Pourquoi choisissons-nous le plus parcimonieux ? **Un arbre est une micro-théorie impliquant des hypothèses de transformations de caractères. Les théories (et donc les arbres) en concurrence se mesurent à l'aune de leur cohérence interne.** Par chance, en reconstruction phylogénétique, nous avons les moyens de mesurer la cohérence de nos théories, ce que n'ont pas les historiens qui utilisent le même régime de preuve mais sans algorithmes. La parcimonie est juste une mesure de la cohérence des arbres, c'est-à-dire qu'elle mesure la cohérence des données sous une loi explicative. D'une manière générale, **une théorie est cohérente lorsque les hypothèses qu'elle implique sont compatibles ou se corroborent entre elles**. Plus elles se corroborent et moins il est besoin d'en faire. L'arbre le plus parcimonieux est simplement le plus cohérent, maximisant la congruence des caractères et minimisant la fraction contradictoire des caractères qui sont alors interprétés sous forme d'hypothèses *ad hoc* d'homoplasies (Farris, 1983), toujours sous une loi explicative particulière » (Lecointre, 2004, p. 11), *c'est nous qui soulignons*.

2. Les végétaux : un concept aux multiples visages

Comme nous venons de le préciser, les végétaux, comme les animaux ou tout autre groupe biologique, désignent des concepts scientifiques. Ce sont des constructions humaines en dépôt dans la culture et qui n'ont de sens qu'au regard des problèmes auxquels ils répondent. Existe-t-il une unique acception du groupe des végétaux ou est-ce que les végétaux ont un contour variable selon les différents problèmes travaillés et/ou les différentes époques ? Examinons successivement la nature du groupe des végétaux selon les deux types de classification scientifique fonctionnelle et phylogénétique. Ensuite, nous dresserons un rapide panorama de l'évolution des idées concernant ce groupe.

2.1. Les végétaux dans les classifications fonctionnelles

Dès à présent, soulignons qu'en fonction des auteurs le terme de végétal est utilisé comme synonyme de plante[16], désignant les végétaux « plantés », c'est-à-dire ancrés à leur substrat (algues fixées et plantes terrestres). D'autres encore limitent le terme aux seules plantes terrestres. En anglais, la différence n'existe pas, puisque le terme utilisé est « plants » pour désigner les végétaux. Nous n'utiliserons donc pas le terme de plantes pour éviter toute ambiguïté.

Dès l'Antiquité, les végétaux désignent les organismes immobiles et insensibles. Dans la classification linnéenne, ils forment l'un des trois règnes de la nature (Linné, 1735) : règne animal (*regnum animale*), règne végétal (*regnum vegetabile*) et règne minéral (*regnum lapideum*). Cette conception duale du vivant, opposant les végétaux aux animaux, continue d'alimenter largement le sens commun. Le développement des recherches biologiques, en particulier de la physiologie qui cherche à comprendre le fonctionnement des êtres vivants, a révélé que l'immobilité et l'insensibilité ne sont en fait qu'apparentes. En effet, les végétaux perçoivent les facteurs environnementaux, tels que la gravité, la photopériode, la température, le toucher, etc. Ils se déplacent par croissance et grâce à des structures spécialisées : e.g. spores, graines. D'autres végétaux sont unicellulaires et se déplacent grâce à des mouvements flagellaires. À l'inverse, des espèces animales sont fixées au stade adulte, comme les coraux ou les huîtres. Si la distinction fonctionnelle entre animaux et végétaux basée sur la vie de relation, qu'il s'agisse de la locomotion ou de la perception sensorielle, pose de nombreux problèmes, qu'en est-il d'une classification fondée sur la fonction de nutrition ? L'étude de la nutrition des êtres vivants permet de constituer un groupe réunissant les êtres vivants qui se

[16] D'après CNRTL, plante : 1532 «exemplaire du règne végétal» (*Grammaire de G. Du Wes*, éd. F. Génin, Paris, 1852, p.1053 d'apr. Ch. Schmittds *R. Ling. rom.* t.43, p.29)

nourrissent par photosynthèse, qui sont capables de produire leur propre matière organique à partir de matière minérale et qui en convertissent l'énergie lumineuse. Cette définition fonctionnelle exclut les champignons des végétaux dont le champ d'étude, la mycologie, est pourtant étroitement liée à la botanique. Ce mode de nutrition autotrophe basée sur la photosynthèse leur confère un rôle essentiel dans les écosystèmes, celui de producteurs primaires à la base des réseaux trophiques. Il est pertinent de grouper les organismes photosynthétiques au sein des végétaux dans le cadre d'une classification fonctionnelle. C'est donc à des problèmes physiologique (de type nutritionnel) et écologique que vient répondre une telle classification.

Mais, en toute logique, utiliser une conception fonctionnelle des végétaux implique d'y inclure les cyanobactéries (également appelées « algues bleues ») qui réalisent le même type de photosynthèse oxygénique. Robert Harding Whittaker (1969, p. 151) ne s'y trompe pas quand il écrit : « the blue-green algae, which are functional plants ». Les cyanobactéries sont des acteurs majeurs de la production primaire par photosynthèse dans les milieux aquatiques. Par contre, les organismes holoparasites qui ont perdu la photosynthèse au cours de l'évolution ne sont plus des végétaux au sens fonctionnel. Marc-André Selosse (2008) explique que, sur un plan fonctionnel, certains organismes peuvent être à la fois animaux et végétaux[17]. Il souligne également l'importance de la mise en place de relations symbiotiques entre deux espèces dont l'une est photosynthétique. Des animaux comment les coraux hébergent dans leurs cellules des algues photosynthétiques, les zooxanthelles (Dinophytes), faisant de cette association symbiotique une entité mixte, à la fois autotrophe et hétérotrophe.

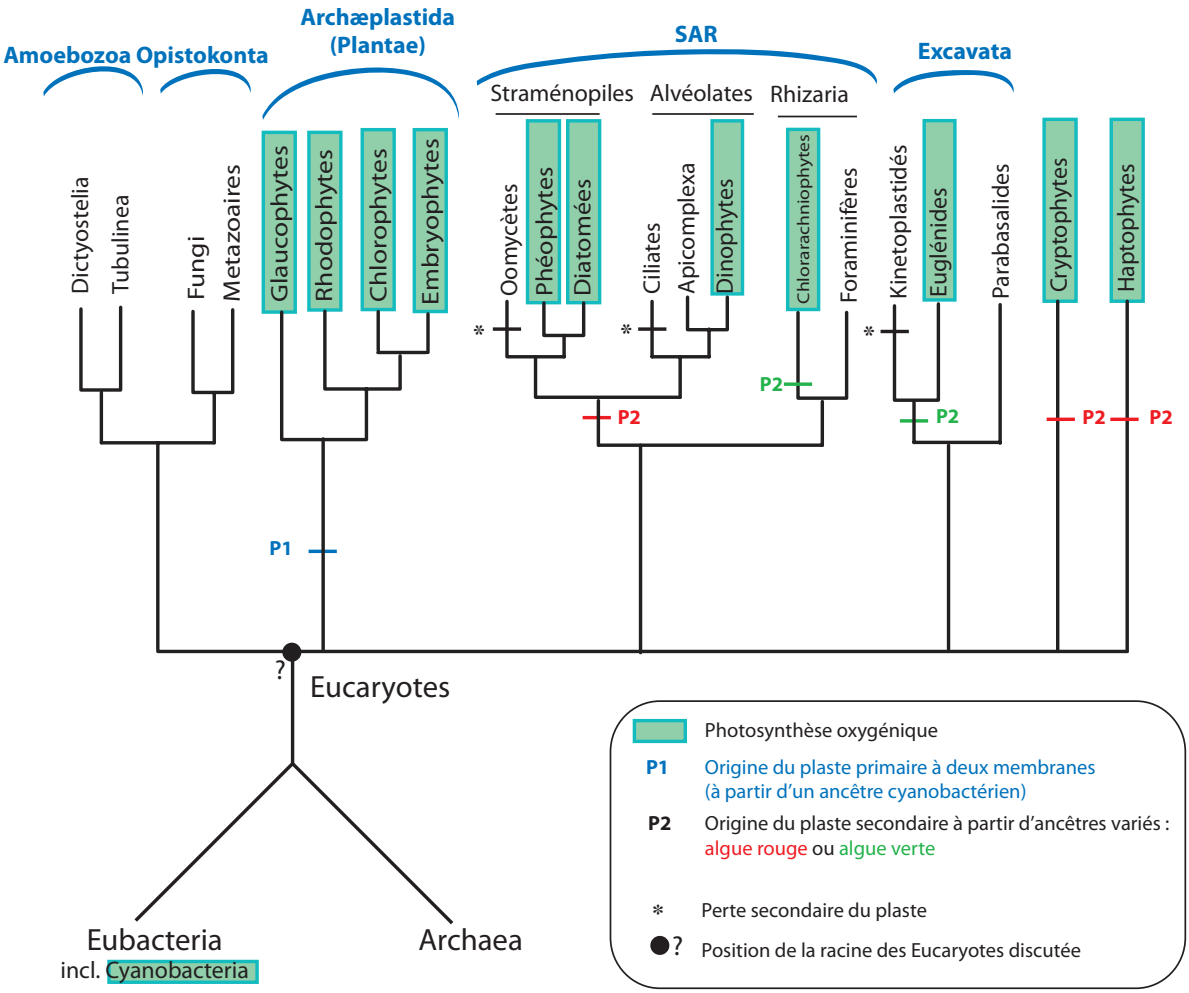
Un exemple plus récent questionne la traditionnelle distinction entre animaux et végétaux. C'est le cas du gastéropode marin *Elysia chlorotica* (une « limace de mer ») qui acquiert les plastes de l'algue *Vaucheria litorea* (Straménopiles) en la consommant. Les plastes sont fonctionnels pendant plusieurs mois et la photosynthèse est permise grâce à l'expression d'un gène plastidial intégré dans le génome nucléaire de l'animal lors d'un transfert horizontal entre les partenaires (Rumpho *et al.*, 2008). Cet animal n'est-il donc pas devenu végétal sur un plan fonctionnel ?

Si le concept fonctionnel de végétal peut désigner une stratégie trophique (2008), quelle est la nature du groupe des végétaux dans la classification phylogénétique actuelle ?

[17] « Certaines algues, comme des dinophytes, capturent et digèrent des proies unicellulaires qui leur fournissent de l'azote, du phosphate et un peu de carbone, une hétérotrophie qui s'ajoute à leur photosynthèse. La plupart des eucaryotes étant microscopiques (l'essentiel de la diversité du vivant est invisible), **la division du monde entre animaux et végétaux peut paraître pertinente à l'œil nu, mais s'effondre sous le microscope.** L'évolution des eucaryotes est jalonnée de transitions entre l'état hétérotrophe et l'état photosynthétique » (Selosse, 2008, p. 232), *c'est nous qui soulignons.*

2.2. Les végétaux dans la classification phylogénétique actuelle

Sur un plan phylogénétique, les végétaux définis fonctionnellement par le partage de la photosynthèse ne constituent pas un groupe de nature monophylétique, mais polyphylétique, à savoir plusieurs lignées non étroitement apparentées, ne partageant pas un ancêtre commun exclusif et ayant acquis la photosynthèse par des histoires évolutives indépendantes. L'arbre phylogénétique présenté en figure 2 montre que les groupes photosynthétiques (en vert) appartiennent à différentes branches de l'arbre du vivant.



Rhodophytes : appelées communément « algues rouges »
Chlorophytes : appelées communément « algues vertes »
Embryophytes : appelées communément « plantes terrestres »
Phéophytes : appelées communément « algues brunes »
Métazoaires : appelés communément « animaux pluricellulaires »

Figure 2 : arbre phylogénétique du vivant, modifié à partir de Adl *et al.* (2012) et Burki (2014)

Les analyses phylogénétiques révéleront que la photosynthèse, réalisée par les plastes chez les Eucaryotes, est convergente et est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution (Keeling,

2013; Palmer, Soltis, & Chase, 2004; 2008). Les plastes des Eucaryotes photosynthétiques sont des organites issus de plusieurs événements d'endosymbiose primaire ou secondaire (cf. figure 3).

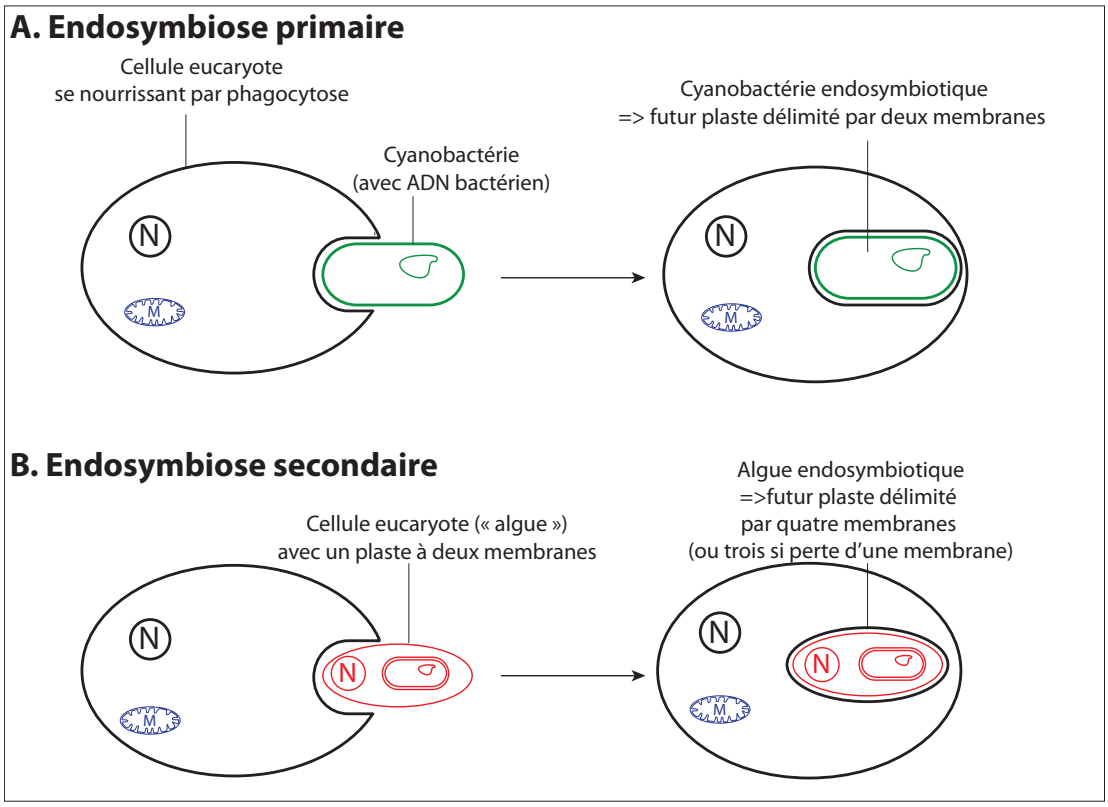


Figure 3 : origine des plastes par endosymbiose primaire ou secondaire

Les végétaux (au sens fonctionnel) n'existent pas d'un point de vue phylogénétique. Mais nous pouvons convenir de nommer végétaux une seule lignée monophylétique de l'arbre du vivant. Il peut s'agir des Archaeplastida, nommés par certains auteurs « lignée verte » (Lecointre & Leguyader, 2006), ayant acquis un plaste à deux membranes par endosymbiose primaire. Il peut également s'agir d'un groupe plus restreint, tels que les Chlorobiontes également nommés Viridiplantae et formés des Chlorophytes et des Embryophytes, sur la base du partage de la chlorophylle a et b. Il est enfin possible de définir au plan phylogénétique les végétaux comme les seuls Embryophytes, qui possèdent un embryon se nourrissant à partir de l'organisme maternel, et qui désignent les plantes terrestres : mousses, fougères, conifères, plantes à fleur. Il semble donc nécessaire de s'entendre sur ce que l'on appelle « végétaux » comme l'explique G. Lecointre (2010)[18].

[18] « Le terme commun de « végétal » n'a jamais reçu d'assignation officielle sur un arbre phylogénétique[18] [*au sens hennigien*]. Il faut donc s'entendre sur ce qu'on appelle « les végétaux ». Si l'on entend par « végétal » tout ce qui fait photosynthèse, alors les végétaux ne sont pas un groupe naturel [*au sens de groupe monophylétique*]. En effet, de multiples endosymbioses passées entre des micro-organismes photosynthétiques et des cellules d'origines diverses réalisées voici plus d'un milliard d'années font que

En raison des multiples événements endosymbiotiques qui engendrent des transferts génétiques latéraux à l'origine d'une chimérisation des génomes, les relations phylogénétiques ne s'expliquent pas uniquement par une relation verticale de descendance. Aussi certains auteurs (Doolittle, 1999; Selosse, 2010, 2011) préfèrent substituer à la métaphore de l'arbre hiérarchisé celle de réseau phylogénétique (ou d'arbre réticulé).

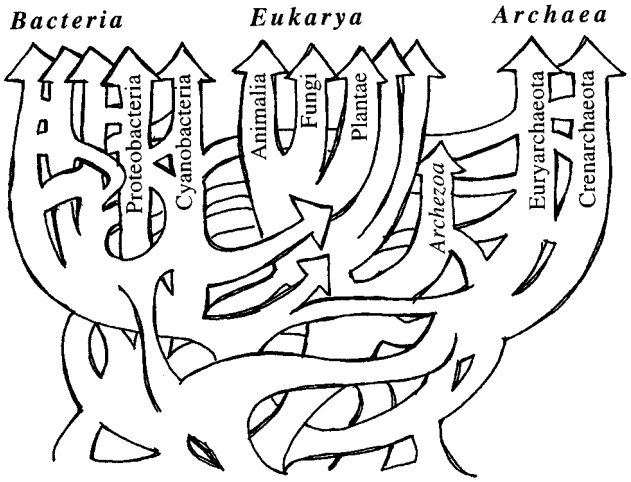


Figure 4 : arbre réticulé ou réseau phylogénétique, reproduit de (1999, p. 2127)

Cette approche complexifie l'étude des relations de parentés entre organismes, comme l'explique M-A. Selosse.

> « Considérons le cas des différents génomes du maïs : le génome des plastes se place au sein de bactéries photosynthétiques (les cyanobactéries), et celui des mitochondries parmi les alpha-protéo-bactéries. Cela signifie que certains organites sont d'anciennes bactéries, capturées dans la cellule eucaryote par endosymbiose. Remarquons au passage qu'une tentative d'identification de la position du maïs par les séquences de ses plastes aurait conduit à le classer parmi les cyanobactéries, ce qui constitue bien sûr une aberration ! **On retrouve ici le paradoxe déjà signalé plus haut, et qui est l'une des caractéristiques des gènes transférés d'une lignée à l'autre : leur position évolutive n'est pas celle de leur contenant actuel** » (Selosse, 2010, p. 55), *c'est nous qui soulignons*.

En conclusion, les végétaux forment un concept polysémique. Fonctionnellement, il peut désigner une stratégie trophique. Phylogénétiquement, ce concept n'existe plus au sens du règne végétal traditionnel, en raison de l'évolution de systématique ou bien il peut désigner

plusieurs lignages d'eucaryotes ont acquis la capacité photosynthétique plusieurs fois indépendamment. Ainsi les algues brunes ne sont pas apparentées aux algues vertes, mais aux diatomées. Si l'on entend par « végétaux » les organismes qui réalisent la photosynthèse grâce au chloroplaste, alors le groupe des végétaux correspond à l'acquisition première du chloroplaste et sont appelés « lignée verte » (qui comprend les algues rouges, les glaucophytes, les algues vertes et les plantes érigées). Enfin, si l'on entend par « végétaux » les organismes dotés de certains pigments photosynthétiques, à savoir les chlorophylles a et b (responsables de la couleur verte), alors les végétaux sont synonymes de chlorobiontes (algues vertes et plantes érigées). **Au sens phylogénétique et dans les classifications modernes, le « règne végétal » (de Reviers, 2002), dans son contenu traditionnel, n'existe plus** » (Lecointre, 2010, p. 5), *c'est nous qui soulignons*.

un groupe monophylétique, les Archaeplastida ou encore un groupe d'extension plus limitée tels que les Chlorobiontes ou les Embryophytes. Il est donc essentiel de définir de quel concept végétal nous parlons pour lever toute ambiguïté.

Outre cette diversité contemporaine de significations, le concept de végétal est issu d'une longue histoire que, dès à présent, nous entendons caractériser tant sur le plan historique que sociologique.

2.3. Les végétaux, un concept issu d'une histoire scientifique et sociale

Saisir toute l'épaisseur du concept nécessite d'étudier sa construction historique et d'identifier les raisons des rectifications successives. De plus, les végétaux constituent l'objet d'étude d'une discipline : la botanique. Une brève étude de l'histoire de cette discipline dans sa dimension sociologique nous permet de mieux percevoir l'héritage qui pèse toujours sur la perception que l'on peut éventuellement avoir des végétaux aujourd'hui.

2.3.1. Les différents sens accordés aux végétaux à travers l'histoire de la systématique

Outre la diversité des significations possibles des végétaux selon le type de classification mobilisée, la complexité de ce concept provient également de son histoire. Durant les deux derniers siècles, la systématique a évolué profondément et avec elle le groupe des végétaux. Si la dualité du vivant, séparé en deux règnes animaux et végétaux, perdura pendant plusieurs siècles, elle n'a cependant pas résisté au développement de la biologie moderne, marquée notamment par l'essor de la théorie cellulaire et de la théorie de l'évolution au XIX^{e} siècle. Le questionnement relatif à la place des micro-organismes, aux caractéristiques mi-végétales et mi-animales, a largement contribué à la remise en cause de la vision duale du monde vivant (Sapp, 2009). Le développement de la cladistique et l'utilisation de méthodes moléculaires sont responsables de changements importants de la systématique dans la seconde moitié du XX^{e} siècle. Un arbre phylogénétique récent (cf. figure 2) révèle en effet que le règne végétal, au sens originel du terme, n'est pas monophylétique. L'évolution du nombre de règnes de l'arbre du vivant (Scamardella, 1999) a profondément bouleversé la nature systématique du groupe des végétaux, les espèces qu'il englobe et leurs caractères communs. Aussi comprendre les sens successifs accordés au groupe des végétaux nécessite d'étudier les changements de la systématique du vivant et ses raisons.

Nous pourrions penser que l'évolution du concept n'a pas laissé de trace particulière et qu'elle serait sans influence pour les étudiants de biologie à l'université aujourd'hui. Pourtant certains systèmes classificatoires ont été fortement popularisés, comme la classification du vivant en cinq règnes proposée par R. H. Whittaker (1969). Dans ce système, les végétaux, nommés Plantae, forment le règne des organismes eucaryotes photosynthétiques multicellulaires. Bien que ce système soit remis en cause, des vestiges de la pensée de ce biologiste existent dans des manuels de biologie actuels[19].

En conclusion, le concept de végétal a été largement rectifié avec l'histoire de la systématique du vivant, dont les traces restent encore perceptibles de nos jours. Nous nous proposerons d'étudier cette histoire dans la troisième partie de notre thèse afin d'identifier des leviers didactiques potentiels.

À présent, déplaçons notre regard sur la botanique, discipline scientifique qui prend les végétaux comme objet d'étude. Comprendre la genèse et l'évolution de cette discipline peut contribuer à mieux comprendre ce que sont les végétaux dans leurs différentes dimensions, dont la composante sociale, afin d'examiner ce que le monde académique nomme aujourd'hui le végétal au niveau institutionnel : laboratoires, revues, enseignements universitaires, etc. Nous souhaitons ainsi montrer que la botanique est perçue par ses acteurs comme par le public comme présentant une certaine unité, en dépit des ambiguïtés de la définition de son objet (le « végétal »).

2.3.2. Les végétaux : histoire sociale et institutionnelle

L'étude des végétaux correspond à une discipline : la botanique. Étudier une discipline revient à poser le regard sur le fonctionnement d'une communauté scientifique. Francis Halbwachs propose une définition de la physique, en soulignant l'importance des institutions. Nous pensons transposable cette réflexion à cette autre discipline scientifique qu'est la botanique.

> « Il reste que la physique a une existence sociologique relativement bien définie, qui fait que le mot figure dans un grand nombre de textes où il est bien "saisi" par les lecteurs. Il existe des institutions explicitement dévouées à la physique, par exemple des enseignements spécifiques dans les universités de tous les pays et des laboratoires de recherche qui leur sont associés. Il existe des manuels traitant des programmes réglementaires correspondant à ces enseignements, des revues spécialisées dans la publication des recherches de ces laboratoires, etc. Dans ce sens la physique est délimitée strictement (et sans qu'une justification théorique de cette délimitation soit nécessaire) par des règlements » (Halbwachs, 1974, p. 14).

[19] « Robert Whittaker's five-kingdom system was a standard feature of biology textbooks during the last two decades of the twentieth century. Even as its popularity began to wane at the end of the century, vestiges of Whittaker's thinking continued to be found in most textbook accounts of biodiversity » (Hagen, 2012, p. 67)

L'histoire du concept « végétal » n'est pas suffisante à éclairer celle de l'objet et l'histoire de la communauté des scientifiques utilisant ce concept est tout aussi déterminante. L'étude de la discipline « botanique », de sa naissance et de son évolution, peuvent contribuer à mieux cerner l'objet d'étude : les végétaux. Nous présenterons tout d'abord la genèse de la botanique en tant que discipline autonome, puis nous montrerons que l'influence de la botanique se manifeste encore de nos jours, à travers le code de nomenclature des espèces, la structuration d'un champ de recherche identifié et des enseignements universitaires.

- **La construction d'une discipline académique**

Longtemps associée à l'herboristerie, la médecine et l'agriculture, l'étude des végétaux possédait une visée utilitaire. La botanique va constituer progressivement une discipline autonome. À titre d'exemple, nous pouvons indiquer le rôle important joué par le développement des jardins botaniques en Europe dès le XVI^{e} siècle, tout comme les grandes expéditions naturalistes du XVI^{e} au XIX^{e} siècle. À Paris, c'est en 1635 que le Jardin royal des Plantes médicinales fut créé, devenant plus tard, en 1718, le Jardin royal des Plantes. Cet établissement comptait trois chaires de professeurs : botanique, anatomie et chimie (Laissus & Torlais, 1986). Après la Révolution, en 1793, c'est le Muséum national d'histoire naturelle qui lui succéda, élevant alors le nombre de chaires de trois à douze (Laissus, 1995, p. 20). Parmi ces chaires, deux étudieront les végétaux : « botanique dans la campagne » (Antoine-Laurent de Jussieu) et « botanique dans le muséum » (René Desfontaines), qui évolueront rapidement au XIX^{e} siècle.

En Europe, le premier professeur de botanique remonte au XVI^{e} siècle, en Italie, avec la nomination de Francesco Bonafede (1542) à la chaire des « simples » (Hill, 1915, p. 191).

Au Collège royal, créé en 1530 et qui sera à la Révolution à l'origine du Collège de France, une chaire consacrée à la seule *Histoire naturelle* fut instituée en 1778 et attribuée à Louis Daubenton pendant vingt ans (de 1778 à 1799), puis à Georges Cuvier (1800-1832). Avant la création de cette chaire d'Histoire naturelle, une même chaire concernait à la fois : la médecine, la chirurgie, la pharmacie et la botanique, bel indice combien révélateur d'une non émancipation totale de la botanique (Laissus & Torlais, 1986, p. 279) ! Plusieurs savants cumulaient certaines chaires : signalons le cas de Joseph Pitton de Tournefort avec les chaires de médecine et botanique : professeur de médecine et botanique au collège royal de 1706 à 1708, professeur de botanique au Jardin du Roi, docteur en médecine à la faculté de Paris et membre de l'Académie royale des sciences (Ibid., p. 80). Cet exemple de cumul de chaires indique combien la botanique entretenait de liens conséquents avec la médecine. Un autre et

similaire exemple, d'un siècle plus récent, est celui du grand naturaliste Augustin Pyrame de Candolle. Il fut nommé en 1810 professeur titulaire de la chaire de médecine à la jeune Faculté des sciences de Montpellier puis, en 1810, titulaire de la chaire de botanique (Granel, 1974, p. 831).

La faculté des sciences de Paris fut créée au début du XIX^{e} siècle. Parmi les huit professeurs nommés en 1809, René Desfontaines, professeur au Muséum national d'histoire Naturelle, est nommé en charge de la « botanique et physique végétale », fonction qui évoluera en chaire de « Botanique, anatomie et physiologie végétale ». De nombreuses chaires verront le jour : Organographie végétale, Botanique, Physiologie végétale, Écologie végétale…

Derrière la dimension unificatrice de l'emploi du terme « botanique », se cache le développement de différents champs disciplinaires. L'anatomie végétale s'est développée à partir du XVII^{e} siècle, avec des microscopistes comme R. Hooke (1635-1703), un Anglais considéré comme l'inventeur du microscope ou l'Italien M. Malpighi (1623-1694). La physiologie végétale débute au XVII^{e} siècle avec des scientifiques comme J.-B. Van Helmont (1579-1644), puis se développe fortement au cours des XVIII^{e} et XIX^{e} siècles (Lance, 2013; Sachs & Robin, 1892/2010). Citons parmi d'autres J. Ingenhousz (1730-1799), J. Priestley (1733-1804), J. Senebier (1742-1809), N. T. de Saussure (1767-1845), dont les travaux ont été particulièrement marquants .

De nombreux autres champs disciplinaires vont également se développer et étudier les végétaux en se distinguant, suivant les objets et les techniques utilisées, en cytologie végétale, écologie végétale (Hagen, 2010), biologie moléculaire végétale, etc.

En conclusion, plusieurs éléments permettent d'indiquer comment la botanique est devenue progressivement un champ de recherche autonome, indépendant de la médecine et de la pharmacie pour, enfin, se subdiviser en différentes disciplines nouvelles. Cette caractérisation succincte de la genèse d'une communauté scientifique en botanique contribue à la compréhension de l'existence d'un concept de végétal dans sa dimension sociale.

Malgré la diversité des approches biologiques étudiant les végétaux aujourd'hui, nous entendons étudier des indices attestant de la persistance actuelle d'une dimension unitaire du champ. Pour cela, nous allons examiner la façon dont sont nommées les espèces à travers les codes de nomenclature, ainsi que la façon dont les laboratoires de recherche, les revues et les enseignements universitaires revendiquent leur rattachement au domaine végétal.

- **Un code de nomenclature botanique**

Sur le plan taxonomique, différents codes de nomenclature existent au niveau international. Ceux-ci consistent en un ensemble de règles permettant de déterminer quel nom donner à une espèce. Un code concerne la botanique depuis le début du XX^{e} siècle et, plus récemment, un Code international pour la nomenclature des plantes cultivées. Valéry Malécot en relate les origines.

> « Le congrès international de botanique de Paris (en 1900) puis celui de Vienne (en 1905) seront l'occasion de rédiger et d'approuver le 1er Code International de Nomenclature Botanique (= CINB) (…). Dans la suite du XX^{e} siècle, d'autres phénomènes vont apparaitre dans le débat nomenclatural avec, par exemple, la scission des règles applicables aux plantes cultivées dans les années 50 avec la création du Code International de Nomenclature des Plantes Cultivées (CINPC). Dans les années 1970-1980, ce sera au tour des bactériologistes de prendre leurs distances par rapport aux plantes sauvages (en particulier pour les « algues bleues », officiellement le premier code de nomenclature des bactéries datant de 1947) » (Malécot, 2008, p. 404).

Le changement de statut des « algues bleues » (ou cyanobactéries) est fort éclairant puisque ce groupe relevant de la nomenclature botanique a finalement basculé dans la nomenclature des bactéries. Il est le reflet de la distinction apparue entre Eucaryotes et Procaryotes dans la première moitié du XX^{e} siècle. Pour les animaux, il existe le « Code international de nomenclature zoologique », qui a été défini à l'occasion du quinzième congrès international de zoologie de Londres, en 1958. Notons que le « Code International de Nomenclature Botanique » fut modifié récemment lors du XVIII^{e} Congrès international de botanique (CIB) à Melbourne, en 2011. Il s'appelle actuellement « Code international de nomenclature pour les algues, les champignons et les plantes » (CIN).

En conclusion, il est intéressant de constater que malgré l'évolution des idées relatives à la nature du groupe des végétaux dans la classification phylogénétique, un même code s'applique toujours aujourd'hui pour les champignons, les algues et les plantes terrestres qui étaient regroupés dans les végétaux, au sens originel du terme. Il y a donc pérennance du concept traditionnel de végétal dans le code de nomenclature en vigueur.

D'un point de vue académique, de quelle façon se décline le concept de végétal aujourd'hui en sciences de la vie ?

- **Des laboratoires, des revues de recherches et des sociétés savantes**

Au niveau académique, un champ disciplinaire est structuré à travers des laboratoires de recherche, des formations universitaires, des revues, des colloques et des sociétés savantes.

Sur le plan des laboratoires académiques, une façon de les identifier est de rechercher les équipes CNRS (*Centre national de la recherche scientifique*). Cette méthode n'est pas exhaustive car certaines équipes peuvent ne pas être liées au CNRS mais à d'autres établissements scientifiques, comme l'INRA (*Institut national de recherche agronomique*) par exemple. D'autres équipes peuvent aussi travailler sur les végétaux mais au sein d'un laboratoire plus vaste et donc ne pas apparaître dans cette liste. Cette méthode permet cependant de fournir une image de certains laboratoires se revendiquant comme travaillant sur les végétaux ou les plantes en 2016. L'utilisation des mots-clés « végétal » et « plante » dans le moteur de recherche du CNRS[20] permet d'identifier les laboratoires listés dans le tableau 1.

Code unité	Intitulé (sigle)	Ville(s)
Mot clé : végétal		
UPR5301	Centre de recherche sur les macromolécules végétales (CERMAV)	Grenoble
UMR5168	Laboratoire de Physiologie Cellulaire Végétale (LPCV)	Grenoble
UMR5546	Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales (LRSV)	Auzeville Tolosane
UMR7265	Biologie végétale et microbiologie environnementales (BVME)	Saint Paul-les-Durance Marseille
FRE3727	Laboratoire de Biotechnologies Végétales Appliquées aux plantes aromatiques et médicinales (BVpam)	Saint-Etienne
Mot clé : plante		
UPR2357	Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP)	Strasbourg
UMR2594	Laboratoire des Interactions Plantes - Microorganismes (LIPM)	Castanet-Tolosan
UMR5004	Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes (BPMP)	Montpellier
UMR5096	Laboratoire Génome et développement des plantes	Perpignan
UMR5120	Botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations (AMAP)	Montpellier
UMR5667	Reproduction et développement des plantes (RDP)	Lyon
UMR9213	Institut des Sciences des Plantes de Paris Saclay (IPS2)	Orsay, Gif-sur-Yvette, Évry
FRE3727	Laboratoire de Biotechnologies Végétales Appliquées aux plantes aromatiques et médicinales (BVpam)	Saint-Etienne
ERL6300	Mécanismes et gestion des interactions plantes-microorganismes	Dijon

Tableau 1 : laboratoires affiliés au CNRS en 2016 et affichant le terme « végétal » et/ou « plantes » dans leur nom d'équipe

[20] Moteur de recherche des laboratoires CNRS : https://web-ast.dsi.cnrs.fr/l3c/owa/annuaire.recherche/index.html, consulté le 01 février 2016.

Une recherche plus approfondie concernant les questions travaillées par ces laboratoires ainsi que les organismes modèles utilisés permet d'examiner ce qu'ils appellent végétaux ou plantes. Suivant les cas, le terme « plante » est utilisé avec une acception très large, incluant les algues, ou réduite aux Embryophytes (plantes terrestres), ou encore aux seules plantes à fleurs (Angiospermes).

Certains laboratoires utilisent les deux termes. Ainsi sur sa page de présentation, l'Institut de biologie moléculaire **des plantes** se définit de la façon suivante : « L'IBMP est aujourd'hui le premier centre français du CNRS en **Sciences du Végétal** »*, c'est nous qui soulignons.*

L'analyse de la description des recherches menées par ces équipes révèle que le terme « botanique » ne s'utilise plus. Il est remplacé par d'autres expressions dont celle de « sciences du végétal », peut-être en raison de l'image perçue comme « datée » du terme botanique et, sans doute, par l'évolution des recherches dans lesquelles les approches moléculaires sont importantes.

Concernant les revues de recherche en sciences du végétal, la liste est longue. Pour n'en citer que quelques-unes : *Trends in Plant Science, Current Opinion in Plant Biology, Plant Cell, Plant Physiology, Journal of Plant Sciences* et *New Phytologist*.

Les sociétés savantes se réclamant de la botanique ou des sciences du végétal sont également nombreuses au niveau international. Citons en France la Société Botanique de France (SBF), fondée en 1854, ainsi que la Société Française de Biologie Végétale (SFBV), créée en 1955. Aux États-Unis, l'American Society of Plant Biologists (ASPB) existe depuis 1924 et publie deux revues importantes dans le domaine : *Plant Cell* et *Plant Physiology*.

Il existe aussi des formations universitaires affichant le terme « végétal ». La Société Française de Biologie Végétale recense[21] onze masters « verts » (dont deux portent le nom « sciences du végétal ») et dix écoles doctorales en France.

En conclusion, malgré la multiplicité de significations du groupe des végétaux et l'évolution des idées en systématique, il apparaît que la discipline scientifique, que nous l'appelions botanique ou sciences du végétal de façon plus récente, existe bel et bien socialement et institutionnellement. L'existence des sciences du végétal pourrait constituer donc un puissant facteur d'inertie, alors même que la notion de végétal telle que révélée par la science moderne est de moins en moins claire car devenue polysémique.

Une source supplémentaire de complexité provient également des différents usages du concept de végétal selon les disciplines biologiques. Nous allons vous les présenter ci-après.

[21] Formations de master et ED en sciences du végétal recensées par la Société Française de Biologie Végétale : http://sfbv.snv.jussieu.fr/MASTERS.php et http://sfbv.snv.jussieu.fr/ECOLES.php (consulté le 01 février 2016)

2.4. Le concept de végétal selon les disciplines biologiques et les problèmes travaillés

Le concept de végétal revêt différents sens selon les contextes biologiques et les contextes problématiques.

Certaines disciplines étudient les végétaux en tant qu'objet d'étude. Il s'agit de la biologie et de la physiologie végétales, subdivisés en de nombreux champs suivant les objets et les méthodes mobilisées (e.g. anatomie végétale, histologie végétale, physiologie végétale, phytopathologie). Dans des disciplines comme l'écologie, les végétaux sont un concept-outil permettant d'appréhender les relations trophiques entre les êtres vivants, les cycles de la matière et de l'énergie.

Si l'on y regarde de près, le terme « végétal » utilisé par les biologistes sert, dans de nombreux cas, d'adjectif pour spécifier un modèle d'étude, telle que l'espèce-modèle *Arabidopsis thaliana* (Brassicacées). On retrouve ce cas de figure pour plusieurs laboratoires listés précédemment. Selon les recherches, leur portée ne peut pas être généralisable à l'ensemble des végétaux (au sens fonctionnel du terme). Le qualificatif « végétal » est mobilisé avec un degré d'extension très variable suivant les cas et se signale souvent comme étant une opposition au terme « animal » ou comme une réduction aux seules plantes terrestres. L'usage du terme « végétal » pour qualifier un modèle biologique reste souvent très réducteur.

Il est fréquent que des spécialistes de physiologie végétale ne travaillent que sur des modèles de plantes terrestres, voire de plantes à fleurs. Ainsi, un chercheur en sciences du végétal, étudiant la circulation des sèves ou bien la morphogenèse florale, utilise *de facto* un concept de végétal réduit à un groupe biologique limité.

En biologie cellulaire, l'application du concept de végétal pour désigner un type d'organisation cellulaire est circonscrite aux seuls Eucaryotes photosynthétiques. Comme les autres biologistes, les biologistes cellulaires travaillent sur des modèles expérimentaux. Ils n'utilisent pas nécessairement le terme « végétal » pour qualifier les cellules de l'ensemble des organismes eucaryotes photosynthétiques. Il n'existe pas, en effet, un unique modèle de cellule végétale. Toutes les cellules eucaryotes photosynthétiques n'ont pas de paroi (exemple des Euglénophytes) ou de plasmodesmes, structures participant à la communication intercellulaire, dont la présence est circonscrite au groupe des Plasmodesmophytes. Au-delà de cette diversité et aux yeux d'un biologiste cellulaire, les cyanobactéries sont trop différentes des cellules eucaryotiques pour chercher à les regrouper au sein des végétaux. Les

cyanobactéries sont classiquement étudiées par des microbiologistes, appartenant à une discipline distincte.

En conclusion, l'exemple des végétaux apparaît particulièrement fécond sur un plan didactique en raison de sa multiplicité d'acceptions selon les classifications mais aussi selon les champs disciplinaires, d'une part, et de sa profonde rectification historique, d'autre part. Si les chercheurs ont conscience de la limite de leurs travaux et de leurs portées, qui dépendent étroitement de la nature de leur recherche et des organismes-modèles utilisés, l'existence d'un champ disciplinaire institué revendiquant les sciences du végétal (ou la botanique) peut donner à un observateur non expert l'illusion d'une unité apparente de l'objet « végétal ». À l'université, les enseignants-chercheurs, ayant « incorporé » la signification particulière du concept de végétal qui dépend de leur champ, utilisent le plus souvent celui-ci de façon implicite, sans nécessairement énoncer aux étudiants les autres significations du concept dans divers contextes disciplinaires. Dans notre thèse, nous questionnerons les étudiants pour se rendre compte s'ils décodent les implicites et articulent les multiples significations du concept de végétal associés aux différentes logiques de classification.

Notre recherche porte sur des étudiants en fin de formation universitaire (master) préparant le CAPES[22], concours de recrutement des professeurs de sciences de la vie et de la Terre (SVT). Présentons à présent les raisons du choix du public afin de mieux cerner les enjeux didactiques.

3. Le public étudié

Nous justifierons dans un premier temps les raisons du choix d'étudiants préparant le CAPES SVT avant de situer, dans un second temps, notre recherche par rapport au contexte national de la réforme de la formation et du recrutement des enseignants.

3.1. Les raisons du choix du public

L'étude des végétaux fait partie du curriculum de *sciences de la vie et de la Terre*, de l'école primaire à l'université. En licence, les végétaux sont étudiés dans de multiples unités d'enseignement de manière trop souvent morcelées et cloisonnées. Selon les disciplines, les étudiants sont confrontés aux multiples significations implicites du concept de végétal présentées préalablement. L'intégration des différents champs disciplinaires reste pour une large part à la charge des étudiants. Comprendre les différents sens utilisés pour un même

[22] CAPES : certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré, concours français de recrutement des professeurs de collège et lycée.

concept scientifique et pouvoir les articuler au sein d'un réseau de signification implique pour les étudiants de percevoir la nature des problèmes biologiques que cherche à résoudre chaque champ disciplinaire de la biologie. Construire une vision globale du vivant nécessite de construire des liens entre les différentes approches biologiques pour penser de façon cohérente le fonctionnement du vivant et son évolution. G. Lecointre (2010) explicite l'importance de cette mise en lien pour éviter d'aboutir à des contradictions.

> « Étudier la biodiversité ne consiste pas seulement à compter les espèces. C'est aussi spécifier des différences, des ressemblances et des liens entre entités, des entités qui peuvent être des populations, d'espèces ou même d'écosystèmes. Ces liens sont de nature fonctionnelle lorsqu'on est écologue ou physiologiste. Mais ces liens sont aussi, dans la profondeur de l'histoire, des liens généalogiques que le systématicien traduira en degrés relatifs d'apparentement. **À l'heure de la synthèse des connaissances, ces deux approches doivent être pensées en même temps. Sinon on aboutit à des contradictions.** (…) Comprendre la biodiversité, c'est donc comprendre ce que l'on regarde (le « quoi »), qui passe par la taxonomie, la systématique, l'anatomie comparée, la phylogénie, parce que la question « quoi » est indissociable, dans la biologie d'aujourd'hui, de la question « d'où cela vient-il ? ». Comprendre la biodiversité, c'est ensuite comprendre son fonctionnement qui relève de la question « comment cela marche-t-il ? », autant posée dans l'organisme (génétique, biochimie, physiologie, embryologie...) qu'à l'extérieur de celui-ci (écologie, éthologie, sociologie...) » (2010, p. 7-8), *c'est nous qui soulignons*.

Les études fonctionnelles et historiques de la biodiversité devraient être pensées « en même temps » selon G. Lecointre. L'articulation de ces différentes approches nécessite de la part des étudiants une prise de recul et un décloisonnement entre les différentes disciplines biologiques. D'un point de vue didactique, il nous semble que cela pose la question temporelle de la programmation des enseignements – que signifie réellement « en même temps » ? – ainsi que l'élaboration de dispositifs didactiques favorisant le travail de synthèse par les étudiants.

Notre intérêt concernant les étudiants de master préparant le concours de recrutement de professeurs de SVT tient au fait que cela permet d'étudier, après plusieurs années de formation universitaire, la façon dont ils articulent les différents problèmes biologiques : l'exemple des végétaux s'y prêtant particulièrement. L'enjeu de cette étude est d'autant plus important que les futurs enseignants, à leur tour, auront à enseigner au collège et au lycée les différentes approches biologiques en relation avec la biodiversité et le groupe des végétaux.

Le choix de se restreindre à des étudiants préparant le CAPES permet de limiter l'hétérogénéité du public étudié. En effet, en France, le concours a un programme national qui

constitue un facteur d'uniformité, facteur propice à une étude à grande échelle dans les différentes universités françaises.

3.2. Une recherche positionnée autour d'une réforme de la formation et du recrutement des enseignants

Notre recherche cible spécifiquement les étudiants préparant le concours de recrutement (CAPES) dont la place dans le cursus a été modifiée en 2013. La thèse s'est déroulée sur une période temporelle durant laquelle le système de formation et de recrutement des enseignants a été réformé au niveau national. Il s'agit de la réforme dite de « refondation de l'école de la République », comprenant la mise en place lors de la rentrée universitaire 2013/2014 des écoles supérieures du professorat et de l'éducation (ESPE) et des masters MEEF (métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation). Durant la période 2010-2013, le concours se préparait durant la seconde année de master (nommée M2). Puis dès lors, c'est durant la première année de master (nommée M1) que les étudiants préparent le concours, la seconde année étant marquée par l'entrée active en alternance dans le métier d'enseignant. En raison de ce contexte de réforme nationale et souhaitant travailler avec les étudiants préparant le CAPES, nous avons réalisé une première enquête durant l'année 2012/2013 (avant la réforme) avec des étudiants de M2 spécialité « enseignement et formation en SVT » et une seconde enquête durant l'année 2014/2015 avec des étudiants de M1 MEEF parcours SVT.

Le thème biologique de notre recherche et le public étudié étant précisés, dégageons plus précisément en quoi cette étude historique pourrait se révéler féconde pour un usage didactique. Cette focalisation sur les fonctions que l'histoire des sciences peut remplir dans une perspective didactique va nous permettre d'introduire, dans un second temps, la méthodologie de la reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques, celle-ci même qui structure notre thèse.

4. Fécondité d'une approche historique au niveau didactique

Au cours des deux derniers siècles, le concept de végétal aura profondément évolué avec l'histoire des sciences, particulièrement en lien avec les changements importants de la systématique. À la suite de nombreux auteurs étudiant les relations entre didactique et histoire des sciences, nous pensons que l'histoire des sciences présente différentes potentialités didactiques que nous souhaitons examiner et mettre à profit dans notre thèse. L'association de recherches en histoire des sciences et en didactique présente différentes perspectives utiles à notre travail, mises en relief dans la synthèse récente proposée par Cécile de Hosson et Patricia Schneeberger (2011).

Nous entendons caractériser trois fonctions jouées par l'histoire des sciences pour un usage didactique : éclairer les difficultés des apprenants, procurer des matériaux historiques pour élaborer un parcours d'apprentissage et approcher la nature de la science d'un point de vue épistémologique.

4.1. L'histoire des sciences comme moyen d'éclairer les difficultés des apprenants

D'un point de vue épistémologique, l'étude historique permet de mieux comprendre les savoirs à enseigner dans leur profondeur. Elle peut constituer une référence utile pour « identifier les difficultés et les obstacles persistants associés à l'apprentissage de ces savoirs en contexte scolaire » (de Hosson & Schneeberger, 2011, p. 1).

Édith Saltiel et Laurence Viennot discutaient déjà, en 1984, de la question des similitudes entre des idées historiques et le raisonnement spontané d'élèves. Elles indiquaient que l'histoire des sciences permet de prendre la mesure de la résistance à long terme de certaines idées et de ne pas sous-estimer les difficultés posées par l'apprentissage de ces concepts par les élèves[23].

L'approche comparatiste entre histoire des sciences et modes de raisonnement des apprenants doit veiller à ne pas céder à la tentation d'une vision récapitulationniste naïve « suivant laquelle l'esprit de l'enfant récapitulerait les étapes de l'histoire de la pensée scientifique » (Gohau, 1995, p. 23). Patricia Crépin-Obert explique que les didacticiens ont pris une distance avec cette conception récapitulationniste et elle exprime une position à laquelle nous souscrivons quant au projet comparatiste entre études didactique et historique.

[23] « (...) at least the history of Science, through the long term resistances it manifests, gives us a better chance **not to underestimate our students' difficulties**. It also indicates that certain concepts and notions should not be introduced too quickly » (Saltiel & Viennot, 1984, p. 214), *c'est nous qui soulignons*.

> « Nombreux sont les didacticiens qui appellent, d'une façon consensuelle, à s'affranchir d'emblée d'un parallélisme ou « récapitulationnisme » naïf (Chevallard, 1985 ; Raichvarg, 1987 ; Gohau, 1995). Tout projet comparatiste est délicat, les cadres théoriques et les méthodologies étant spécifiques aux domaines disciplinaires. Cependant les interactions recherchées entre histoire et didactique des sciences représentent bien « un coup de force épistémologique » sur les enjeux génériques du savoir, d'où son intérêt majeur lorsqu'il prend ses distances avec l'ici et maintenant – ailleurs et autrefois – (Mercier *et al.*, 2002). Rapprocher ce qui ne peut se comparer en construisant des relations non immédiatement données est un vrai défi. (…) Et il peut exister **un « effet miroir »** *a priori* remarquable entre les erreurs historiques et les erreurs scolaires (Astolfi & Peterfalvi, 1997, p. 200) ; ou encore **un parallélisme partiel des constructions de problèmes entre la pensée historique et la pensée des élèves** (Orange, 2003). La construction scolaire des problèmes dépend des conceptions des élèves. De même, la construction historique démontre l'emprise des obstacles épistémologiques tels l'expérience première, la connaissance générale, l'animisme (Bachelard, 1938/2004) ; ou encore l'idéologie évolutionniste assortie d'une pensée finaliste, anthropocentrée, liée au progrès universel (Canguilhem, 1988/2000) » (Crépin-Obert, 2011, p. 26), *c'est nous qui soulignons*.

Notre approche comparative des sphères historique et didactique devra donc veiller à identifier les contextes spécifiques dans lesquels s'actualisent des modes de raisonnement pouvant constituer des obstacles.

4.2. L'histoire des sciences comme source de problèmes féconds permettant d'élaborer un parcours d'apprentissage

Pour Georges Canguilhem, l'histoire des sciences doit s'intéresser à la façon dont les problèmes ont été posés.

> « Pour ce faire, il faut s'intéresser, dans l'histoire d'une science, moins à ses résultats, célébrés comme des victoires, qu'à la façon dont les problèmes, même non résolus, ont été posés. Il faut considérer la science comme une entreprise laborieuse de lecture des phénomènes, dont les hypothèses sont la grille. La genèse des hypothèses doit donc être privilégiée par rapport au recensement des observations » (Canguilhem, 1979, p. 8).

Considérant qu'un enseignement scientifique doit permettre de situer les savoirs dans leur contexte d'origine et pas seulement dans leur contexte actuel, Michel Fabre établit alors un lien substantiel entre histoire des sciences et apprentissages.

> « D'abord, les théories scientifiques ne sont intelligibles qu'en fonction des controverses qui leur ont donné naissance et de celles qu'elles ne manquent pas de susciter par la suite. Dès lors, enseigner les sciences de manière scientifique, **c'est les situer historiquement dans un double contexte :** leur contexte d'origine et leur contexte actuel, pour autant qu'il reste accessible aux élèves, c'est-à-dire en le dépouillant de ses aspects techniques. Ensuite, pour qu'une théorie soit

> comprise par les élèves, il faut leur permettre d'exprimer les objections qui leur viennent à l'esprit. La science est contre intuitive, elle s'oppose à nos préjugés, au sens commun » (Fabre, 2010, p. 161), *c'est nous qui soulignons*.

En conclusion, nous cherchons à identifier dans notre étude historique les problèmes auxquels se sont confrontés les systématiciens en construisant leur classification de manière à comprendre la nature du groupe des végétaux dans leur système classificatoire. Cette analyse historique devrait permettre d'en extraire des problèmes féconds à soumettre aux étudiants dans le but de les aider à saisir toute la complexité et la profondeur du concept de végétal.

4.3. L'histoire des sciences comme approche de la nature de la science

Depuis de nombreuses années se trouve avancée l'idée que l'enseignement des sciences ne doit pas porter seulement sur l'apprentissage de connaissances scientifiques mais également sur la nature de la science (ou NoS pour Nature of Science). Des auteurs comme Norman Lederman (2007) et Gürol Irzik & Robert Nola (2014) expliquent en effet que la volonté d'élargir l'enseignement scientifique à la façon dont les savoirs scientifiques se construisent date de plus de cent ans. Le thème « nature de la science » (NoS) donne lieu à une volumineuse littérature en didactique des sciences au plan international depuis le début des années 1990. Lederman (2006) définit la nature de la science comme les fondements épistémologiques de l'activité scientifique et des savoirs scientifiques qui en résultent.

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'effet de l'histoire des sciences sur l'image de la nature de la science d'élèves ou d'étudiants. L'ouvrage de revue (*International handbook of research in history, philosophy and science teaching*) piloté par Michael R. Matthews (2014) comprend plusieurs chapitres récents discutant des relations entre histoire des sciences et NoS. Dans leur synthèse, C. de Hosson et P. Schneeberger présentent trois types d'usage didactique de l'histoire des sciences pour travailler la NoS.

> « Plusieurs études comparatives ont ainsi montré que la vision que les élèves ont de la science se trouve modifiée lorsque l'enseignement s'ouvre à l'histoire des sciences (Allchin *et al.*, 1999 ; Irwin, 2000 ; Höttecke, Henke, & Riess, 2012). Il peut s'agir, selon les cas, de faire vivre aux élèves une controverse historique en analysant la nature des arguments en jeu, en présentant les acteurs, les liens entre ces acteurs, leurs outils d'échange (Albe, 2009 ; Maurines & Beaufils, 2010), de reproduire en classe des expériences historiques (Riess, 1995), de placer les élèves en situation d'explorer la diversité et l'adéquation des modèles avec les données empiriques (Laugier et Dumont, 2000) » (de Hosson & Schneeberger, 2011, p. 6).

Notre recherche s'apparente davantage avec le premier usage indiqué, même si nous ne souhaitons pas à proprement parler « faire vivre une controverse » mais plutôt faire conduire aux étudiants une analyse de controverses dans le but d'appréhender l'évolution des idées relatives au groupe des végétaux dans la systématique. Notre objectif n'est pas d'améliorer l'image de la nature de la science des étudiants par notre séquence innovante mais d'étudier, dans une visée compréhensive, ce que le travail historique produit au niveau de l'image de la nature de la science des étudiants. Cependant, bien que non évaluée ici, nous pouvons supposer que la réflexion que les étudiants conduiront sur l'évolution des idées relatives au concept de végétal est de nature à modifier la perception que les étudiants ont de la science.

En conclusion, au vu des travaux qui nous précédent, l'histoire des sciences présente des potentialités didactiques qui nous semblent particulièrement pertinentes pour notre recherche, qu'il s'agisse d'une référence épistémologique permettant d'éclairer les raisonnements des étudiants, de dégager des problèmes féconds pour un usage didactique et de permettre de travailler l'image de la nature de la science. Cette discussion des relations entre ces deux champs de recherche, historique et didactique, nous conduit présentement à expliciter le cadre méthodologique qui structure nos travaux, la reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences (de Hosson, 2011), et à expliquer les raisons de son adaptation.

5. Le cadre méthodologique de la reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences et son adaptation à notre recherche

Nous débutons cette section par une description succincte du cadre développé en 2011 par Cécile de Hosson, puis nous expliquerons en quoi il nous semble bien adapté à nos propres travaux, bien que nécessitant une adaptation à nos propres objectifs et à nos positionnements théoriques.

5.1. Présentation du cadre méthodologique

Dans sa note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Cécile de Hosson définit le cadre méthodologique de la reconstruction didactique de la manière suivante :

> « Associer histoire des sciences et enseignement revient pour nous à créer une **dialectique de nature épistémologique entre deux enquêtes**, l'une, centrée sur les raisonnements des élèves, l'autre tournée vers l'évolution des idées dans l'histoire des sciences. Nous suivons en cela la voie ouverte par Dorier qui s'intéresse à l'épistémologie « en ce qu'elle permet de mieux comprendre les liens entre la constitution d'un savoir dans la sphère savante d'une part et l'enseignement et l'apprentissage de ce savoir d'autre part » (Dorier, 2006, p. 16). Cette dialectique permet 1) de préciser les contraintes didactiques auxquelles le savoir est soumis dans le cadre scolaire, 2) d'assujettir l'enquête historique à ces contraintes de façon à extraire les informations historiques à réorganiser, 3) de faire en sorte que ces informations prennent place dans le système didactique pour favoriser l'acquisition du savoir visé, cette dernière étape nécessitant d'assumer le fait que les informations se présentent sous une forme dissemblable à celle prise au sein de la sphère historique » (de Hosson, 2011, p. 33), *c'est nous qui soulignons*.
>
> « Nous définissons donc une **reconstruction didactique** comme une séquence d'enseignement conçue sur la base **d'informations historiques explicites** et se donnant pour but l'apprentissage d'un concept ou d'une loi physique » (Ibid., p. 34), *c'est nous qui soulignons*.

Cette méthodologie est représentée en figure 5 comme trois enquêtes emboîtées.

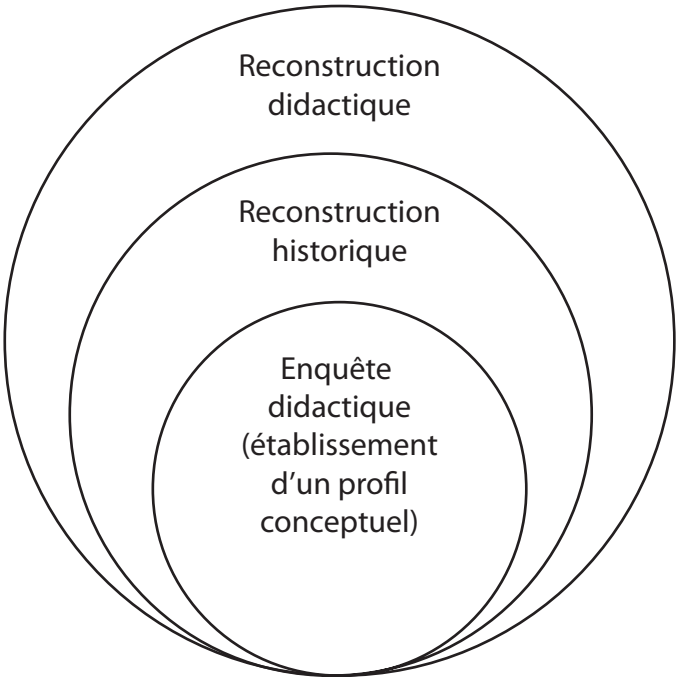


Figure 5 : Schéma de la structuration de la reconstruction didactique. Reproduit de C. de Hosson (2011, p. 35)

Dans cette méthodologie, l'enquête « intermédiaire » est la reconstruction historique. C. de Hosson définit ainsi cette phase historique de la recherche :

> « Il s'agit d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau d'enseignement. Par voie de conséquence, **une reconstruction historique n'est ni objective et encore moins exhaustive, mais apparaît, comme tout projet de reconstruction, contrainte :** « Les reconstructions historiques [sont] toujours incertaines (...). De plus, elles sont toujours partielles. L'historien ne raconte pas tout ce qu'il sait ou pourrait savoir mais ce qui est important (...). L'histoire de l'historien est donc l'effet d'un choix » (Koyré, 1973, p. 391). Toutefois, nous nous préservons au mieux des abus d'interprétation qu'une lecture non-experte pourrait engendrer en appuyant nos lectures sur quelques exégèses philosophiques et historiques faisant autorité. Ainsi donc, les éléments historiques retenus par le didacticien ainsi que la façon dont celui-ci choisit de les organiser peuvent conduire à des reconstructions différentes de celles proposées par les historiens des sciences. (…) Dans cette perspective, nous admettrons qu'il existe **un « programme » didactique de reconstruction historique** » (Ibid., p. 34).

Nous reprenons totalement à notre compte l'idée que l'investigation historique soit orientée par l'enquête didactique préalable. En effet, nous irons chercher dans l'histoire des sciences des leviers didactiques potentiels pour cibler des difficultés d'étudiants.

Par ailleurs, comme nous ciblons l'évolution contemporaine du concept de végétal en systématique, les sources historiques sont abondantes et non lacunaires. Nous éviterons d'utiliser le terme de « reconstruction » pour qualifier notre recherche historique. Nous pouvons d'ailleurs souligner que dans un écrit récent avec Renaud Chorlay, historien des

mathématiques, Cécile de Hosson utilise l'expression « historical investigation » plutôt qu' « historical reconstruction » (Chorlay & de Hosson, 2016).

5.2. Pourquoi mobiliser ce cadre méthodologique dans notre recherche ?

Ce cadre nous semble particulièrement adapté à notre recherche, qui nécessite l'élaboration et l'expérimentation d'une séquence de formation, et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, parce que l'usage de matériaux historiques dans la reconstruction didactique y est explicite, contrairement à d'autres méthodologies d'élaboration de séquence d'enseignement-apprentissage dans lesquelles l'histoire reste implicite pour les apprenants, bien qu'ayant servi à orienter le concepteur. Souhaitant travailler la dimension construite du concept de végétal et son évolution au XX^{e} siècle et pensant que cela pourrait constituer un moyen pour en percevoir toute la profondeur et la multiplicité d'usage, nous tenons à ce que les étudiants travaillent à partir de matériaux historiques explicites.

Le but premier de cette méthodologie de construction de séquence est « l'apprentissage d'un concept ou d'une loi physique », se démarquant ainsi d'autres scénarios d'enseignement utilisant l'histoire des sciences dans le but de faire évoluer l'image de la nature de la science des élèves (e.g. Maurines & Beaufils, 2011). Bien que développé en didactique de la physique, nous pensons utilisable en biologie ce cadre méthodologique d'élaboration de scénario d'enseignement. En effet, même si les objets d'étude ne sont pas les mêmes, les épistémologies disciplinaires en biologie et en physique ainsi que le contrat méthodologique des chercheurs (Lecointre, 2012a) sont suffisamment proches pour penser raisonnable cette transposition méthodologique.

Le choix de matériaux historiques en vue de l'élaboration d'une séquence d'enseignement suppose d'être au clair sur ses objectifs, en particulier concernant les difficultés des étudiants que la séquence se propose de travailler. Cela suppose donc de mobiliser les résultats de recherches antérieures portant sur les modes de raisonnement et les conceptions des apprenants au niveau considéré.

Concernant notre sujet d'étude : le concept de végétal, quels sont les travaux de recherche disponibles dans le champ didactique ? À propos des végétaux dans les différents types de classification (fonctionnelle et phylogénétique) au niveau master, les recherches didactiques existantes ne répondent pas totalement à nos besoins. De nombreuses études didactiques existent concernant les végétaux mais elles n'articulent pas la dualité de registres explicatifs fonctionnel et phylogénétique, et ce à un niveau de formation universitaire, comme nous

désirons le faire. Certaines recherches portent sur le fonctionnement des végétaux, telles que leur reproduction (e.g. Boyer, 2000; Schussler, 2008) et/ou leur nutrition (e.g. Brown & Schwartz, 2009; Cañal, 1999; Orange, 2012ba; Rumelhard, 1985; Wang, 2007). D'autres études ont une visée écologique et les végétaux sont envisagés en rapport à leur fonction dans les écosystèmes (e.g. Leach, Driver, Scott, & Wood-Robinson, 1995; Lin & Hu, 2003; Magntorn & Helldén, 2007; Peterfalvi, Rumelhard, & Vérin, 1987). En ce qui concerne la nature du groupe des végétaux face à la diversité du vivant, de nombreux travaux concernent les élèves du premier degré (de 3 à 10 ans) et, le plus souvent, limitent leur étude aux seules plantes terrestres (e.g. Barman, Stein, McNair, & Barman, 2006; Bell, 1981; Bianchi, 2000; Gatt, Tunnicliffe, Borg, & Lautier, 2007; Ryman, 1974; Rymell, 1999; Tunnicliffe & Reiss, 2000). Des recherches récentes portent sur la compréhension et les difficultés des apprenants concernant l'utilisation des arbres phylogénétiques. La littérature sur ce thème labellisé « tree thinking » est grandissante (e.g. Baum, Smith, & Donovan, 2005; Gregory, 2008; Halverson, Pires, & Abell, 2011; Novick & Catley, 2013, 2014; Sandvik, 2008). Mais, de façon générale, ces travaux se centrent sur les raisonnements mis en œuvre pour construire et analyser un arbre phylogénétique et non sur l'étude du groupe des végétaux, d'un point de vue de l'articulation entre situations mobilisant différents registres explicatifs.

La nécessité de réaliser une caractérisation fine des raisonnements des étudiants et de leurs difficultés justifie la mobilisation du cadre méthodologique de la reconstruction historique dans lequel l'enquête didactique est première.

En conclusion, nous retenons donc le cadre méthodologique de la reconstruction didactique, fondée sur des matériaux historiques pour structurer notre recherche en trois phases. L'enquête didactique correspondra au second chapitre de la thèse, l'étude historique au troisième et la reconstruction didactique au quatrième. Une discussion générale sera réalisée au cours du cinquième et dernier chapitre.

Cependant, notre recherche se spécifie par deux aspects que nous entendons justifier à présent sur le plan théorique : l'importance accordée aux problèmes scientifiques et la volonté de baser la reconstruction didactique sur des articles scientifiques.

5.3. Adaptation du cadre à nos positionnements théoriques spécifiques et à nos objectifs

5.3.1. Importance accordée aux problèmes dans les apprentissages

Sur le plan didactique, nous choisissons de nous positionner dans le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation (Fabre & Orange, 1997), développé initialement au

Centre de recherches en éducation de Nantes (CREN). Il s'inscrit dans une approche rationaliste de l'activité scientifique (Bachelard, Popper, Canguilhem) où la construction de problème est un moyen d'accès à la connaissance scientifique. Christian Orange explique l'importance des problèmes pour définir des savoirs scientifiques, ainsi que leur caractère apodictique.

> « Les savoirs scientifiques ne sont pas de simples propositions vérifiées, des résultats à des questions bien posées. C'est la relation problème solution qui leur donne tout leur sens en les impliquant dans un réseau de raisons. Ils échappent ainsi à la contingence des connaissances factuelles et prennent un certain caractère de nécessité » (Orange, 2002, p. 30).
>
> « Est nécessaire ce dont le contraire est impossible ; contingent ce dont le contraire est possible » (Ibid., p. 38).

Michel Fabre (1999) présente le processus de problématisation comme un double dédoublement. Le premier est « décrit par Bachelard comme un dédoublement des faits et de la théorie. Ce qui est déterminant, c'est que les idées explicatives et les faits, les théories et les faits sont toujours en liens, les faits ne sont pas indépendants de la théorie et réciproquement, « pas de rationalité à vide, pas d'empirisme décousu » (Bachelard, 1949, p. 3) » (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 82). Ce dédoublement entre faits et idées correspond pour les activités scientifiques à un dédoublement entre le registre empirique et le registre des modèles dans un registre explicatif[24] donné (Orange, 1994). Le second dédoublement « fait apparaître d'un côté ce qui relève de l'assertorique, ce qui est ainsi (les faits et les idées et les liens entre ces faits et ces théories) et sur un autre plan, ce qui relève de l'apodictique et qui fonde les idées en nécessité » (Lhoste & Peterfalvi, *id.*). En effet, si *« les explications perdent tout caractère de nécessité »*, ce ne sont plus des savoirs scientifiques, mais de *« simples réponses factuelles qui se succèdent au hasard » (1999, p. 194)*. Michel Fabre et Christian Orange résument ce que signifie « faire des sciences » de la façon suivante.

> « Faire des sciences c'est donc abandonner une connaissance d'opinion, une connaissance mal questionnée, assertorique, c'est-à-dire réduite à un simple constat, pour une connaissance qui, une fois problématisée, sera fondée en raison, deviendra apodictique » (1997, p. 40).

Le cadre théorique de la problématisation se caractérise par un positionnement épistémologique très fort concernant la nature des savoirs scientifiques.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, notre recherche entend mettre en place une dialectique épistémologique entre deux enquêtes didactique et historique, dans laquelle la

[24] Pour C. Orange (2012b, p. 132), « le registre explicatif est le monde mental sur lequel s'appuie la construction du modèle et qui lui donne ses qualités explicatives. C'est par ce monde que le modèle fait sens pour le scientifique ou l'élève. »

seconde est orientée par la première. Notre focalisation didactique sur les problèmes que construisent les étudiants justifie que nous portions notre attention sur les problèmes qui ont mobilisé les systématiciens, en construisant une classification fonctionnelle en écologie et une classification évolutive puis phylogénétique, en prenant le cas du groupe des végétaux. Ainsi les matériaux historiques que nous utilisons pour élaborer la reconstruction didactique doivent permettre d'aider les étudiants à construire des problèmes de nature fonctionnelle et phylogénétique.

Ce positionnement nous semble compatible avec le cadre méthodologique de reconstruction historique. En effet, C. de Hosson souligne l'importance des problèmes lors de l'extraction de matériaux historiques :

> « Le choix du problème à extraire de l'écologie historique se voit donc assujetti aux contraintes qui fondent l'écologie didactique (difficultés spécifiques au savoir à enseigner, idées préalables des élèves, temps didactique...). Dans une telle perspective, l'extraction hors de la sphère historique porte essentiellement sur **le problème à résoudre** » (de Hosson, 2011, p. 33), *c'est nous qui soulignons*.

Notre recherche se distingue des travaux conduits par C. de Hosson (e.g. Décamp & de Hosson, 2010; de Hosson & Décamp, 2013) par le recours à des articles scientifiques, donnés à étudier aux étudiants en formation. Nous nous devons d'expliquer les raisons de ce choix.

5.3.2. Utilisation de la littérature scientifique primaire dans la reconstruction didactique

Des recherches s'intéressent à l'usage didactique de la littérature scientifique, qu'elle soit primaire ou adaptée (en anglais PSL pour Primary Scientific Literature et APL pour Adapted Scientific Literature). Un numéro spécial de la revue *Research in Science Education (RISE)* a été consacré en 2009 à l'usage de la littérature scientifique adaptée. Différents auteurs mettent en avant le rôle de la littérature scientifique pour que les apprenants accèdent aux pratiques épistémiques en science et étudient la manière dont les scientifiques construisent leur argumentation[25].

[25] « APL, then, offers **a window into the epistemic practices of science** » (Osborne, 2009, p. 398), *c'est nous qui soulignons*.
« Primary literature provides an authentic context for showing students **how scientists support their claims** » (Koeneman, Goedhart, & Ossevoort, 2013, p. 2009), *c'est nous qui soulignons*.

L'analyse d'articles scientifiques permet de travailler l'idée que les savoirs sont des constructions sociales, historiquement élaborées et donc partiellement œuvrées dans le langage.

> « En effet, l'histoire des sociétés humaines a vu se constituer des formes d'organisation sociale spécifiques, centrées autour d'activité particulière dont les finalités sont partagées par les membres de la communauté. Au sein de chacune, ils stabilisent provisoirement des valeurs, un champ de questions, ils développent, au cours de leur activité, des pratiques matérielles et sociales, des formes d'interaction à caractère sémiotique, des modes d'agir-parler-penser spécifiques, qui fondent la construction d'un rapport au monde et à autrui et d'une rationalité de l'univers, qui leur est propre. Ce sont leurs pratiques, dont leurs pratiques langagières qui donnent leur cohérence à ces communautés qui de fait, sont aussi des communautés discursives » (Jaubert, 2007, p. 42).

Ainsi les apprentissages scientifiques nécessitent la construction des façons d'agir-parler-penser spécifiques de la discipline visée.

Des auteurs comme Tenopir et King (2004, cité par Phillips & Norris, 2009, p. 314) ont montré que la lecture scientifique représente une part centrale de l'activité scientifique (environ un quart du temps du travail des chercheurs). Elle est constitutive de la science.[26] Intégrer un travail sur des articles scientifiques dans l'enseignement serait un moyen de développer une représentation plus authentique de la science en tant que processus (Osborne, 2009).

> « Offering students learning experiences with APL is one way to educate students **both in science** — in that the activity will replicate the kind of activity engaged in by practicing scientists — and **about science in that the activity will afford a more authentic representation of the processes of science** » (2009, p. 398), *c'est nous qui soulignons*.

J. Osborne (2009) attire notre attention sur le fait qu'il ne suffit pas d'insérer dans l'enseignement de la littérature scientifique pour générer une expérience authentique de science. Il est essentiel de fournir un environnement didactique permettant de construire le langage de la discipline avec une position critique.

> « Thus introducing APL literature into a classroom does not, of itself, transform the student experience into something that is an authentic experience of science » (Ibid., p. 400).
>
> « A key ingredient of 'authentication' is providing environments which foster autonomy and support students in **developing a critical awareness of the language of the discipline** » (Ibid., p. 401), *c'est nous qui soulignons*.

[26] « Norris and Phillips have said that reading is "as much a part of scientific inquiry as are observation, measurement, and calculation" (Norris and Phillips 2008, p. 233). Also, "when the reading is of science text, it encompasses a very large part of what is considered doing science. It is not all of science, because it does not include the manipulative activities and working with the natural world that are so emblematic of science" (Norris and Phillips 2008, p. 256) »(Norris et al., 2009, p. 407).

Dans un article scientifique, les chercheurs se positionnent par rapport aux travaux antérieurs et aux autres travaux existant dans le domaine. L'analyse de ces positionnements scientifiques pourrait aider les étudiants à percevoir les controverses et leurs rôles dans la construction des savoirs scientifiques. Nous choisirons des articles dans lesquels les positionnements des auteurs par rapports aux travaux antérieurs et des éléments de controverse sont particulièrement saillants. En donnant à lire des textes scientifiques aux étudiants, nous souhaitons fournir toute leur place aux controverses, et débattre de la relation entre faits et idées plutôt que de rester, tel que le dénonce C. Sutton, dans le seul registre des faits.

> « Une autre difficulté est que les élèves finissent par associer l'écriture scientifique à la transmission de faits plutôt qu'à la discussion d'idées et à la manière de traiter le débat et la controverse. Ceci est également une représentation erronée très grave en ce que la science inclut une controverse intense sur ce qui doit être pris comme factuel » (Sutton, 1995, p. 44, cité par F. Lalevée, 2014, p. 118).

De plus, les chercheurs explicitent classiquement dans un article scientifique la question de recherche qu'ils étudient. Nous pensons qu'un enseignement basé sur des articles scientifiques devrait contribuer à mettre au travail la relation entre les savoirs et les problèmes scientifiques qui leur donnèrent naissance, permettant la construction des manières d'agir-parler-penser spécifique du domaine disciplinaire en jeu.

5.3.3. Une autre modélisation de la reconstruction didactique adaptée à nos objectifs

La reconstruction didactique se caractérise par une dialectique entre recherche didactique et recherche historique. Mais il est nécessaire d'en clarifier l'objectif. Pour C. de Hosson, cette méthodologie de recherche vise à produire une séquence d'enseignement-apprentissage évaluée par la recherche et ciblant des difficultés clairement identifiées par des enquêtes préalables. Dans notre travail, l'objectif principal n'est pas de produire une séquence à diffuser dans la communauté de formateurs d'enseignants de SVT. Nous cherchons à concevoir et expérimenter une séquence qui constituerait avant tout un outil de recherche pour explorer le champ didactique à partir d'un usage explicite de l'histoire des sciences et d'articles scientifiques. Nous proposons de modifier la modélisation de cette méthodologie par rapport à celle élaborée par C. de Hosson (cf. figure 5). En effet, cette auteure représente la méthodologie par trois phases emboîtées. Les trois cercles concentriques traduisent le fait que les deux premières enquêtes sont au service du projet d'élaboration d'une séquence d'enseignement-apprentissage permettant une reconstruction didactique du (ou des)

concept(s) scientifique(s) ciblé(s). La figure 6 schématise la structuration de notre thèse en représentant de façon plus adéquate la manière dont nous envisageons la complémentarité des trois phases de la recherche.

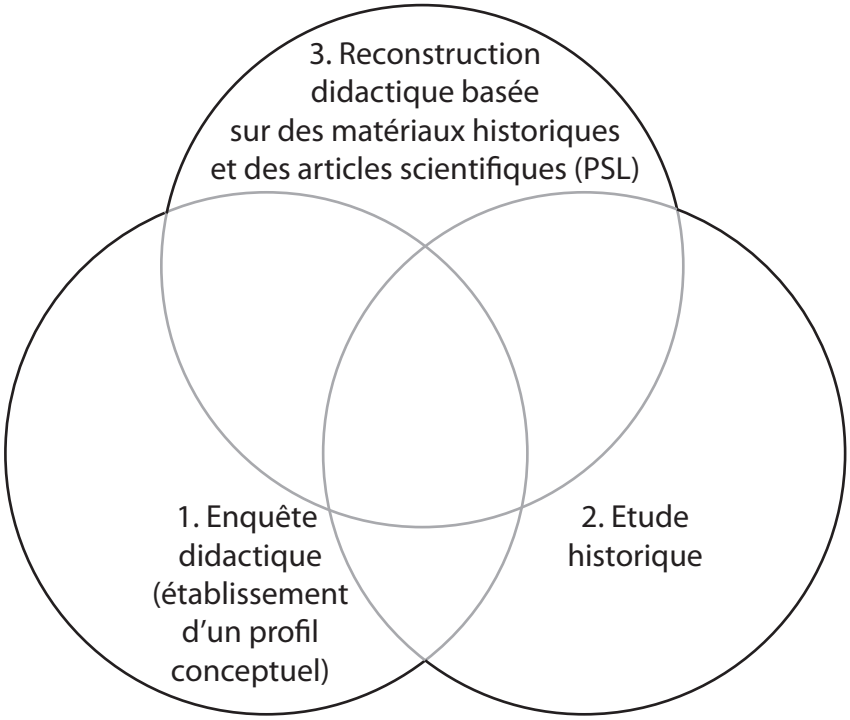


Figure 6 : schéma de la structuration de notre recherche

Si les phases de l'investigation sont reliées par ce dessein commun d'élaboration d'une dialectique de nature épistémologique entre didactique et histoire des sciences, chaque enquête n'est pas totalement subordonnée à une autre et chaque enquête vaut aussi pour elle-même. Nous assumons d'étudier des phénomènes émergents qui nous semblent intéressants à questionner, bien que n'entrant pas totalement dans une visée d'articulation avec une seconde partie de la recherche. La schématisation de la méthodologie de recherche proposée par Cécile de Hosson traduit l'ordre des trois enquêtes, que nous partageons complètement. En effet, l'élaboration et l'expérimentation d'une séquence d'enseignement-apprentissage est la troisième étape de la recherche, puisqu'elle est dépendante des deux enquêtes didactiques et historiques permettant d'en concevoir le scénario. L'étude historique est nécessairement réalisée après l'étude didactique du profil conceptuel des étudiants. Celle-ci permet d'orienter la recherche en histoire des sciences de manière à identifier des leviers historiques permettant de faire travailler aux étudiants des difficultés ciblées, voire même des obstacles.

Ces éléments de positionnement théorique et méthodologique nous permettent d'établir notre problématique ainsi que d'élaborer une première formulation de nos questions de recherche,

questions construites au regard des développements précédents de ce chapitre, tant d'un point de vue biologique, qu'historique et didactique.

6. Problématique et première formulation des questions de recherche

6.1. Problématique de la thèse

Notre thèse souhaite établir un dialogue entre la recherche didactique et la recherche historique concernant la construction des différentes significations du concept de végétal en fonction des classifications fonctionnelle et phylogénétique, qu'il s'agisse ici de la construction historique par les scientifiques ou de la reconstruction didactique par les étudiants, futurs enseignants de SVT.

Notre recherche se structure en trois chapitres principaux (chapitres 2, 3 et 4) dont les objectifs sont les suivants :

1. ***Enquête didactique (chapitre 2)***

Analyser le profil conceptuel des étudiants, c'est-à-dire :

- étudier la conception que mobilisent les étudiants (de niveau master) concernant les végétaux en tant que groupe biologique, en mettant l'accent sur le(s) problème(s) qui fondent la classification proposée par les étudiants dans une situation classificatoire où le registre explicatif n'est pas imposé ;
- et étudier les raisonnements classificatoires convoqués dans des situations de classification fonctionnelle puis phylogénétique, et leur articulation.

2. ***Étude historique (chapitre 3)***

Comprendre l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux dans la systématique au XIX^{e} et principalement au XX^{e} siècle. L'accent sera mis sur le(s) problème(s) que les scientifiques ont cherché à résoudre en élaborant leurs systèmes classificatoires et l'analyse de la nature du groupe des végétaux dans chaque système.

3. ***Reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques et des articles scientifiques (chapitre 4)***

Concevoir et expérimenter une séquence d'enseignement-apprentissage : la reconstruction didactique, de manière à étudier le champ didactique à partir d'un usage explicite de l'histoire des sciences et d'articles scientifiques, c'est-à-dire :

- approfondir notre analyse du raisonnement classificatoire des étudiants, non dans le contexte de réponses à un questionnaire mais dans celui d'un débat relatif aux articles présentant plusieurs systèmes classificatoires ;

- mettre au jour les conditions de possibilité d'un enseignement basé sur l'histoire des sciences et des articles scientifiques permettant de construire la multiplicité de significations des végétaux selon les classifications et selon les époques historiques.

Enfin, nous tenons à souligner la spécificité du sujet biologique qui se trouve au centre de nos préoccupations. Nous ne cherchons pas à apprendre aux étudiants un « énième » concept scientifique, dans sa dimension unificatrice, mais les aider à comprendre la polysémie d'un concept biologique, celui de végétal, c'est-à-dire à articuler les différentes significations des végétaux avec leur contextes problématiques spécifiques et le type de classification envisagée. Nous pensons que l'histoire du concept peut contribuer à en saisir toute sa profondeur et sa complexité. Cette hypothèse sera interrogée dans la dernière phase de la thèse. Elle fonde notre volonté d'établir un dialogue entre recherches didactique et historique.

Nous entendons à présent développer les familles de questions de recherches liées à nos trois enquêtes.

6.2. Première formulation des questions de recherche

La figure 7 présente de façon synthétique les questions de recherche qui correspondent aux trois parties de notre thèse. Il s'agit d'une première formulation. Les questions seront reprises et détaillées dans chacune des parties à la lueur des cadrages théoriques spécifiques de chaque enquête.

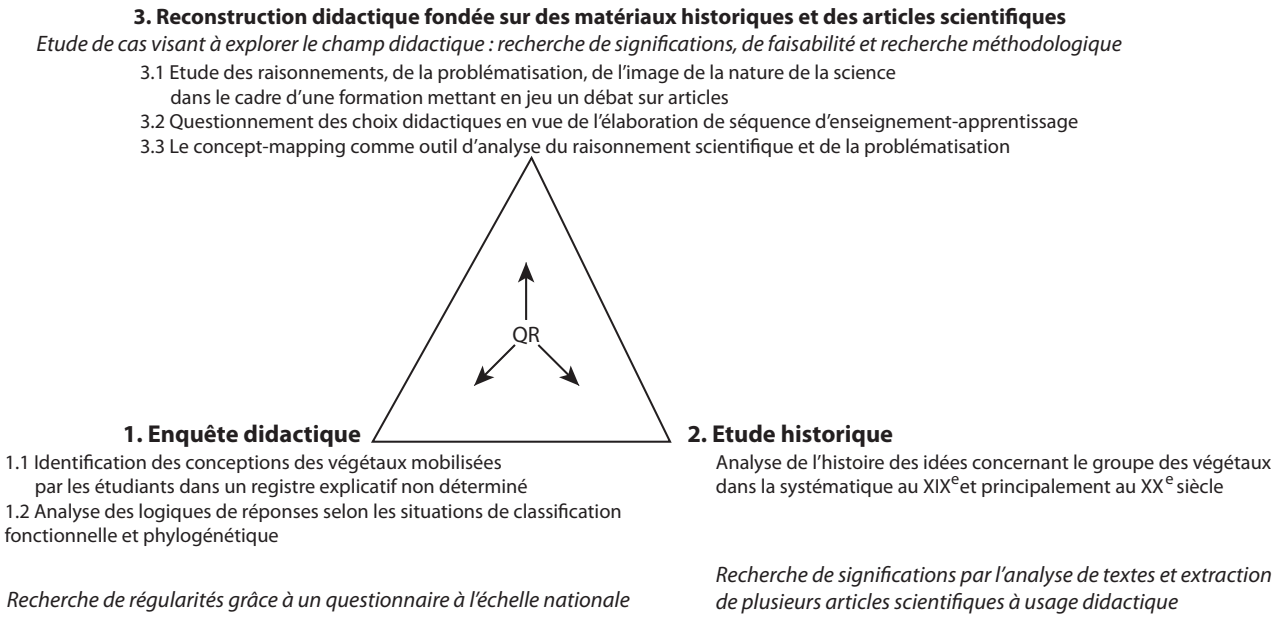


Figure 7 : schématisation des questions de recherche (QR) correspondant aux trois parties de notre thèse

6.2.1. Questions de recherche concernant l'enquête didactique visant à déterminer le profil conceptuel des étudiants, futurs enseignants de SVT

Notre enquête didactique cherche à dégager les conceptions des futurs enseignants relatives aux végétaux, en tant que groupe biologique. Cette enquête relève de la recherche de régularités, pour reprendre la distinction des différents paradigmes de recherche en didactique proposée par J-P. Astolfi (1993). Elle vise une « caractérisation du réel » (Ibid., p. 12). Cela implique de réaliser une étude à grande échelle afin de disposer d'un échantillon important d'étudiants et pouvoir conduire une étude statistique dans le but de dégager des profils conceptuels. Le questionnaire reste l'outil de recueil de données le plus adapté. Nous souhaitons caractériser leur raisonnement de classification du vivant en fonction de plusieurs situations. Notre recherche entend répondre à deux grandes catégories de questions.

- **Identifier les conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification**

Notre enquête vise à inférer les différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique dans le cadre d'une situation de classification ouverte, au sens où le registre explicatif n'est pas imposé.

Nous nous attacherons particulièrement à comprendre quels types de problème fondent la classification réalisée par les étudiants.

De plus, nous chercherons à comprendre comment les étudiants classent-ils des espèces unicellulaires, dont certains caractères sont problématiques car non typiquement animaux ou végétaux (au sens originel du terme) ?

Enfin nous analyserons les réponses des étudiants afin d'identifier si elles font recours à certains modes de raisonnement pouvant exercer la fonction d'obstacle.

- **Identifier les logiques de réponses en fonction des situations et leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique**

En comparaison avec la situation précédente, de nature ouverte, comment évolue la logique de réponse des étudiants dans des situations de classification explicitement fonctionnelle (écologique) puis phylogénétique ?

Comment articulent-ils les logiques fonctionnelle et phylogénétique de la classification concernant les végétaux ?

6.2.2. Questions de recherche concernant l'étude historique

L'étude historique souhaite rendre compte de l'évolution du groupe des végétaux dans la systématique au XIX^e^ et principalement au XX^e^ siècle. Cette période historique est choisie en raison des changements théoriques majeurs en biologie durant le XIX^e^ siècle, notamment le développement de la théorie cellulaire et de la théorie de l'évolution, et des changements profonds dans les méthodes de classification pratiqués au cours du XX^e^ siècle (cf. le débat entre la systématique évolutionniste, la phénétique et la cladistique).

Nous cherchons à comprendre les raisons des changements successifs de l'arbre du vivant ayant conduit à la rectification du groupe des végétaux. Nous souhaitons également identifier la nature des problèmes auxquels les scientifiques se sont affrontés à l'occasion de la construction des systèmes classificatoires successifs. Cette investigation doit permettre le l'identification des obstacles épistémologiques (1938/1993) liés aux constructions de ce concept.

Cette recherche historique étant orientée par l'enquête didactique précédente, nous serons conduits à préciser les questions de recherche en fonction des résultats de l'enquête didactique.

Cette étude historique doit permettre d'extraire des articles scientifiques qui seront soumis aux étudiants lors de la phase ultime de cette recherche, la reconstruction didactique.

6.2.3. Questions de recherche concernant la reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques et des articles scientifiques

- **Étude des raisonnements classificatoires et de l'image de la nature de la science des étudiants**

L'expérimentation de la reconstruction didactique a pour objectif principal d'explorer le champ didactique dans une visée compréhensive. Il s'agit d'une recherche de signification au sens où l'entend Jean-Pierre Astolfi (1993).

> « Les recherches de signification (de type herméneutique) *visent,* elles, à analyser des situations didactiques enregistrées et décryptées, dans la singularité complexe de chacune, et dans la variété possible des registres interprétatif. » (Ibid., p. 13).

Dans notre recherche, il s'agit d'approfondir notre analyse du raisonnement classificatoire des étudiants, non dans le contexte de réponses à un questionnaire (comme dans la première enquête didactique) mais dans celui du débat relatif aux articles présentant plusieurs systèmes classificatoires. Plus précisément, nous entendons caractériser les raisonnements et les

difficultés des étudiants relativement aux principes spécifiques des différentes classifications biologiques ainsi que le processus de problématisation qu'ils mettent en œuvre dans le cadre de la situation didactique expérimentée. L'expérimentation didactique entend étudier aussi l'image de la nature de la science (NoS) que mobilisent des étudiants de master MEEF, futurs professeurs de SVT.

- **Évaluation de certains choix didactiques et détermination de possibles didactiques**

Certains choix majeurs de l'expérimentation seront analysés en vue de déterminer certains possibles didactiques et d'en identifier les limites. Ces questions ont une visée pragmatique et relèvent des recherches de faisabilités, au sens de J-P. Astolfi (1993).

> « Les recherches de faisabilité (de type pragmatique) visent à constituer un corpus sur la base d'innovations contrôlées, capitalisées, et d'en préciser la typologie raisonnée d'utilisation. Elles s'organisent ainsi autour de la détermination d'un possible didactique, dans le cadre d'hypothèses préalables. Ce terme d'hypothèse doit ici être entendu de manière particulière : il désigne les présupposés initiaux susceptibles d'orienter les innovations, dont se trouve évaluée l'heuristique pratique » (Ibid., p. 12).

Nous souhaitons mettre au jour les conditions de possibilité d'un enseignement basé sur l'histoire des sciences et des articles scientifiques afin de construire la polysémie du concept de végétal.

- **Recherche méthodologique : la réalisation de carte conceptuelle comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation**

Nous désirons intégrer dans la reconstruction didactique une séance finale consacrée au bilan de la séquence et qui serait basée sur la réalisation d'une carte conceptuelle. Il s'agit là de représentations graphiques qui « assurent une fonction d'organisation des connaissances relatives à des concepts » (Tiberghien, 1994, p. 54). Nous justifierons dans le chapitre 4 les fondements de ce choix didactique. Cette dernière famille de questions de recherches vise à caractériser les potentialités et les limites de la réalisation de cartes conceptuelles pour étudier le raisonnement des étudiants, d'une part, et le processus de problématisation, d'autre part.

Chapitre 2 : enquête didactique sur les conceptions des végétaux

1. POSITIONNEMENT THÉORIQUE SUR LES CONCEPTIONS DES APPRENANTS 72

1.1. La notion de conception en didactique des sciences 73

1.2. Conceptions et obstacles épistémologiques 74

1.3. Les conceptions : des constructions des chercheurs 76

1.4. Bilan sur notre position concernant la notion de conception 79

2. NOUVELLE FORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE 80

2.1. Identification des conceptions des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification, de leurs modes de fonctionnement et de leurs origines possibles 80

2.2. Étude des logiques de réponses en fonction des situations et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique 81

3. MÉTHODOLOGIE 82

3.1. Méthodologie de recueil des données par questionnaire 82
3.1.1. Étude à l'échelle nationale française 82
3.1.2. Présentation du questionnaire 85

3.2. Méthodologie d'analyse des conceptions dans le cadre d'une situation ouverte de classification 90
3.2.1. Codage des données brutes 91
3.2.2. Analyse *a priori* : catégorisation des conceptions des végétaux 94
3.2.3. Analyse supervisée 98
3.2.4. Analyse non supervisée 102
3.2.5. Analyse de la formulation spontanée de la tension relative à la polysémie du concept de végétal 104
3.2.6. Analyse relative à la place des micro-organismes eucaryotes 104
3.2.7. Étude des obstacles mis en jeu 106

3.3. Méthodologie d'analyse de la relation entre les logiques de réponses et les types de classification 106
3.3.1. Analyse de la relation entre les logiques de réponses et les types de classification 106
3.3.2. Analyse de la logique de raisonnement face à une espèce problématique, une plante à fleurs non chlorophyllienne (orobanche) 107

3.3.3. Étude des nouveaux obstacles mis en jeu 107

3.4. Synthèse de la méthodologie mise en œuvre 108

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION 110

4.1. Résultats concernant les conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification (QR1) 110
4.1.1. Résultats de l'analyse supervisée : une représentation très inégale des différentes conceptions 110
4.1.2. Résultats de l'analyse non supervisée : confrontation des conceptions définies *a priori* et des catégories émergentes 112
4.1.3. Discussion relative aux différentes conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification (QR1a) 116
4.1.4. Une explicitation spontanée très faible de la pluralité du concept de végétal (QR1b) 128
4.1.5. Les difficultés concernant les eucaryotes unicellulaires (QR1c) 129
4.1.6. Les obstacles mobilisés (QR1d) 133

4.2. Résultats concernant la relation entre les logiques de réponses et les situations de classification (QR2) 138
4.2.1. La relation entre la situation de classification et le type de réponses dans un registre explicitement écologique puis phylogénétique (QR2a) 139
4.2.2. La difficulté à articuler les logiques fonctionnelle et phylogénétique dans le cas d'une plante à fleur non chlorophyllienne (QR2b) 146
4.2.3. Étude des obstacles mis en jeu (QR2c) 150

5. CONCLUSION DE L'ENQUÊTE DIDACTIQUE 151

La notion de conception, ou de représentation, est au cœur du développement de la didactique des sciences depuis maintenant plus de quarante ans. Elle tend à décrire la façon dont une personne se représente le monde, et à caractériser un système explicatif utilisé dans un type de situations. Nous souhaitons mettre au jour les conceptions que mobilisent les étudiants de master « enseignement des SVT » concernant les végétaux pris en tant que groupe biologique dans différentes situations de classification. Pour cela et au préalable, nous préciserons notre positionnement théorique concernant la notion de conception ce qui permettra d'affiner les questions de recherche de cette enquête didactique. Le plan qui suit restera classique au sens où seront présentées la méthodologie de recueil, puis l'analyse des données. Enfin, les résultats seront discutés pour chacune des questions de recherche.

1. Positionnement théorique sur les conceptions des apprenants

Après avoir présenté la façon dont nous aborderons le travail concernant les conceptions des étudiants et après avoir positionné nos travaux vis-à-vis des différentes approches développées internationalement sur ce sujet, nous mettrons en relation l'idée de conception

avec celle d'obstacle empruntée à Gaston Bachelard. Enfin, nous expliquerons la façon dont nous envisageons le mode de fonctionnement des conceptions.

1.1. La notion de conception en didactique des sciences

Devant la récurrence de certaines erreurs faites par les élèves concernant des demandes d'explication de phénomènes scientifiques - et cela à différents niveaux de la scolarité - la recherche en didactique des sciences a commencé, au début des années 1970, à prendre très au sérieux les « bêtises » des élèves. Les chercheurs tentèrent de comprendre leur signification. La principale conséquence de cet intérêt pour les conceptions des élèves a été de mettre en question les enseignements scientifiques comme le précisaient Astolfi *et al.* (1978) dans le premier livre de didactique des sciences paru en France.

> « Notre enseignement n'est pas scientifique car il ignore à qui il s'adresse, c'est-à-dire à l'élève. L'élève n'est pas une page blanche qu'il s'agit de « bourrer » ! Il a déjà des représentations sur le monde qui l'entoure » (Astolfi *et al.*, 1978, p. 9)

Les termes sont nombreux : en français, conception, représentation, déjà-là ; en anglais, conception, preconception, misconception, mental model, naïve ou alternative framework. En dépit de cette diversité lexicale, cette notion signale que dans des contextes variés les apprenants se sont construits des moyens de comprendre ce monde qui les entoure. Pour comprendre les processus d'apprentissage, il est nécessaire, d'une façon ou d'une autre, de les prendre en considération.

Au niveau international, deux approches contrastées se distinguent sur le degré de cohérence des conceptions. Nous nous positionnerons par rapport à celles-ci. La première accorde un fort degré de cohérence alors que la seconde envisage des connaissances en pièces, supposant une non-cohérence. Elles sont nommées : 'knowledge-as-theory perspectives' et 'knowledge-as-elements perspectives' (Özdemir & Clark, 2007).

Stella Vosnadiou (1994) s'inscrit dans la première perspective. Elle propose que ces conceptions soient intégrées à des structures théoriques personnelles (« embedded in larger theoretical structures », p. 46). Elle parle de cadre théorique (« framework theory »). Mais il reste important de préciser que dans ce contexte, « le mot théorie est utilisé pour qualifier une structure relationnelle et explicative et non une théorie scientifique explicite et bien formée » (Vosniadou, 1994, p. 47, traduit par Buty & Cornuéjols, 2002, p. 33).

Cette cohérence semblerait expliquer la principale caractéristique de récurrence et de résistance des représentations aux processus d'apprentissage.

Dans le même courant, John Clement (1983) indique que les conceptions constituent des microthéories qui, dans certaines situations, possèdent un certain pouvoir de prédiction[27].

À l'opposé, Andrea di Sessa (2008) s'inscrit dans le second courant 'knowledge-as-elements perspectives'. Pour cet auteur, les conceptions des élèves sont comme des connaissances en pièces (« knowledge in pieces »). Il suggère que les conceptions correspondent, dans certains contextes, à une actualisation d'un ensemble de connaissances qu'il appelle des « phenomenological primitives » (p-prims). Les erreurs sont alors interprétées comme des difficultés pour les élèves dans l'actualisation et la mise en relation de ces différentes connaissances qui peuvent avoir des origines très différentes.

En France, dans le contexte de la didactique des sciences de la vie et de la Terre, l'attention des chercheurs s'est portée sur la notion que les conceptions des apprenants forment un ensemble d'« idées relativement stables qu'utilisent les élèves pour raisonner parce qu'elles sont explicatives pour eux et qu'elles présentent une cohérence interne importante même si elles diffèrent assez fortement des conceptions scientifiques, ou de l'adulte en général » (Astolfi & *et al.*, 1985, p. 9). Christian Orange et Denise Orange Ravachol, auteurs en 2013 d'un article de synthèse sur ce thème, indiquent qu'« il s'agit donc bien de constructions intellectuelles des enfants qui auraient, pour les auteurs, une fonction de modèle (au sens scientifique du terme) » (Orange & Orange Ravachol, 2013, p. 47). En ce sens, nous positionnons notre recherche en proximité de ce courant : 'knowledge-as-theory perspectives' qui cherche à caractériser les cohérences de raisonnement.

1.2. Conceptions et obstacles épistémologiques

Alors que des travaux anglo-saxons (e.g. Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982, p. 212) se réfèrent sur le plan épistémologique à des auteurs comme T. S. Kuhn et I. Lakatos, ceux-ci comparant les conceptions des apprenants à des paradigmes ou des « theoretical hard-core », la didactique française se réfère davantage à G. Bachelard et aux obstacles épistémologiques. C. Orange et D. Orange Ravachol l'affirment clairement :

> « Ces conceptions ont une résistance au changement car elles sont, dans une certaine mesure, cohérentes et efficaces. La didactique française relie ce point au concept d'obstacle épistémologique, ce qui lui donne une signification particulièrement forte » (2013, p. 49).

[27] The preconceptions « constitute micro-theories that students have constructed on their own, and should be respected as such. Because they ordinarily have some predictive power in certain practical situations, they can be thought of as « zeroth-order models » which the students possess » (Clement, 1983, p. 335).

Parce que central dans notre approche des conceptions, nous vous présentons ci-après, le concept d'obstacle formé dans les études épistémologiques de Gaston Bachelard (1938, 1940, 1949), associé au concept de rupture.

L'élaboration de connaissances scientifiques impliquerait, selon Bachelard, un processus de rectification. Celui-ci affirme qu'« il ne saurait y avoir de vérité première, il n'y a que des erreurs premières » (Bachelard, 1970, p. 89). Il y a rupture entre les démarches intellectuelles du sens commun et de la raison scientifique. Y. Girault et Yann Lhoste expliquent l'importance de ce concept de rupture dans l'épistémologie bachelardienne :

> « L'introduction du concept de rupture permet à Bachelard de construire une épistémologie qui refuse le positivisme, puisque le concept de rupture "*détruit l'image linéaire du progrès scientifique par la remise en question d'une propriété postulée de la ligne droite de n'admettre qu'une parallèle menée par tout point pris en dehors d'elle*" (Canguilhem, 1987, p. 444) » (Girault & Lhoste, 2010, p. 33).

L'obstacle épistémologique se trouve défini par Bachelard comme une cause d'inertie de la pensée et ne peut être surmonté que par la rupture : « on connaît *contre* une connaissance antérieure », nous dit-il :

> « c'est dans l'acte même de connaître, intimement, qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles. C'est là que nous montrerons des causes de stagnation et même de régression, c'est là que nous décèlerons des **causes d'inertie** que nous appellerons des **obstacles épistémologiques** (...) Le réel n'est jamais « ce qu'on pourrait croire » mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser. La pensée empirique est claire, *après coup*, quand l'appareil des raisons a été mis au point. En revenant sur un passé d'erreurs, on trouve la vérité en un véritable repentir intellectuel. En fait, on connaît ***contre*** **une connaissance antérieure, en détruisant des connaissances mal faites,** en surmontant ce qui, dans l'esprit même, fait obstacle à la spiritualisation. » (Bachelard, 1938, p. 13-14)*, c'est nous qui soulignons.*

Aussi, le concept d'obstacle épistémologique a pour fonction de « combler la rupture entre connaissance commune et connaissance scientifique » (Lecourt, 1974, p. 27, cité par Girault & Lhoste, 2010, p. 33).

Aussi, l'obstacle est dans la pensée elle-même et ne correspond pas à une difficulté externe au savoir scientifique. Brigitte Peterfalvi exprime très clairement cette idée :

> « Très souvent réifié par la désignation de conceptions fausses qu'on pourrait tenir et évacuer, l'obstacle doit être envisagé plutôt comme un **processus**, quelque chose qui s'oppose à la dynamique de la pensée, qui la fixe et l'empêche d'appréhender des problèmes nouveaux. Ni lacune ni ignorance, c'est au contraire **une sorte de trop plein de connaissances, de la certitude, des réponses, qui s'opposent au questionnement et à la problématisation et qui permet de penser confortablement**. Fantasmes, charge affective et valorisations étrangères au processus de

> connaissance, souvent inconscients, tiennent une place essentielle dans ces processus et correspondent à des archaïsmes de la pensée. » (Peterfalvi, 2008, p. 112)*, c'est nous qui soulignons.*

Aussi, ce concept d'obstacle est en relation étroite avec celui de conceptions, et, pour Astolfi & Peterfalvi (1993), cela explique et stabilise un système de pensée, justifiant la résistance des conceptions. Ils en appellent à une recherche des obstacles afin de donner du sens aux explications des élèves et leur permettre de dépasser une plate description.

> « On peut dire que l'obstacle présente un caractère plus **général et plus transversal** que la représentation [*ou conception*] : il est ce qui, en profondeur, **l'explique et la stabilise**. Diverses représentations, qui portent sur des notions sans lien apparent, peuvent en effet apparaître, à l'analyse, comme les points d'émergence d'un même obstacle. » (Astolfi & Peterfalvi, 1993, p. 106) « Les obstacles ainsi définis, constituent une sorte de ***"noyau dur"*** *des représentations.* Ils correspondent à ce qui fait vraiment **résistance** aux apprentissages et aux raisonnements scientifiques, tout en répondant de façon "confortable" aux besoins d'explication des enfants. Ils permettent de ***dégager le sens des représentations****,* en permettant d'en construire l'interprétation. Car, sans caractérisation satisfaisante des obstacles, les représentations ne peuvent être comprises qu'en termes de "cartographie statistique", comme de simples catalogues anomiques des idées rencontrées chez les élèves » (Ibid., p. 108) *, c'est nous qui soulignons.*

Michel Fabre présente la dialectique outil-obstacle, qui nous semble essentielle.

> « Comme s'il existait des obstacles en soi ? Comme si la même connaissance ne pouvait fonctionner tantôt comme outil et tantôt comme obstacle, selon le contexte ! Ou encore comme si le meilleur outil, d'avoir trop servi ne dégénérait pas en obstacle, fatalement ! (…) Bachelard insiste beaucoup sur cette dialectique outil-obstacle, sur la transformation des idées heuristiques en routines sclérosantes. Moins à vrai dire sur la transformation inverse : de l'obstacle à l'outil ! » (Fabre, 1995, p. 81-82)

Cette caractéristique duale expliquerait qu'un mode de raisonnement ne constitue pas un obstacle dans l'absolu mais, relativement, à un phénomène donné. Ainsi « on ne peut donc rêver d'un apprentissage sans obstacle », nous rappelle J-P. Astolfi (2011, p. 38).

Une conception étant un système explicatif, son identification nécessite donc un travail d'inférence, de construction à partir des productions des apprenants. Travaillant dans un contexte universitaire, nous utiliserons plus volontiers le terme d'étudiant, mais, toutefois, en lui donnant une portée plus générique : celle d'apprenant.

1.3. Les conceptions : des constructions des chercheurs

L'étude des conceptions nécessite d'analyser des productions réalisées par les étudiants sous différentes formes : questionnaire, entretien, interactions verbales en classe, etc et dans des contextes variés : en classe, en dehors de la classe avec des chercheurs…

La figure 8 représente une modélisation de l'étude des conceptions des élèves. Elle nous permet d'expliquer comment nous les analysons.

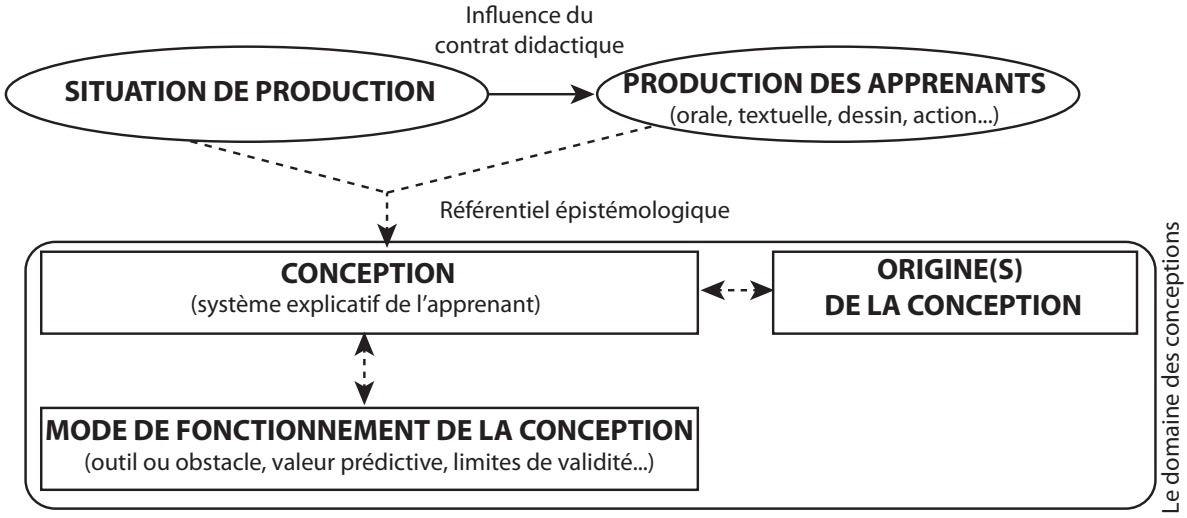


Figure 8 : La façon d'inférer et d'interpréter les conceptions (d'après Astolfi *et al.*, 1985, p. 12). En pointillé : inférences réalisées par l'observateur. La situation de production est scolaire ou non (réponse à une question; anticipation d'action; situation de débat, etc.). L'origine des conceptions est variée.

Cette modélisation des conceptions attire notre attention sur plusieurs points de vigilance.

- **Importance du contexte problématique, de la situation de production et du contrat didactique**

Premier point de vigilance essentiel : ce dont disposent les chercheurs sont des productions d'étudiants obtenues dans un certain contexte (la situation de production), ce dernier n'est pas sans impact sur les productions obtenues. C. Orange et D. Orange-Ravachol rappellent l'importance du « travail du problème qu'on soumet aux élèves et l'importance de la réalisation de la production demandée (texte, schéma ou autres) dans l'élaboration de leur pensée. » (2013, p. 51). Aussi, nous n'envisageons pas la conception comme un déjà-là indépendant de la situation, mais comme étroitement liée à la situation de production, c'est-à-dire des problèmes posés dans le cadre d'une tâche bien particulière.

Le contrat didactique entre le professeur et ses étudiants influence également la nature de la production réalisée. Le chercheur se doit de le prendre en considération dans l'analyse des systèmes explicatifs des élèves.

Il nous semble important d'envisager une conception comme un couple associant la situation de production et donc les problèmes posés avec les réponses des étudiants. Nous rejoignons ainsi la position de Viennot (1985) et Hewson & Hewson (1988), ayant travaillé sur le concept de force :

> « students use different conceptions of force in different circumstances, i.e., their answers are **context-dependent**. », (Ibid., p. 603) *c'est nous qui soulignons.*

La figure 9, reprise des travaux de Laurence Viennot (1985) dans le champ de la didactique de la physique, illustre très clairement cette dépendance à la situation des réponses des étudiants.

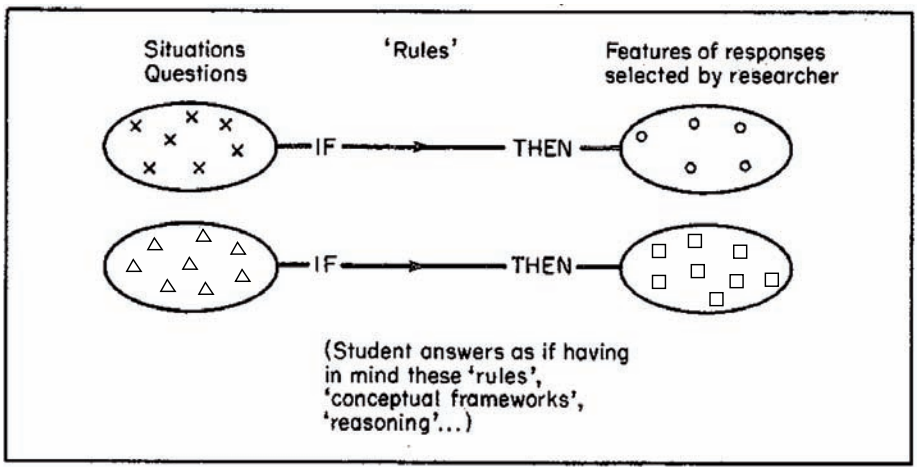


Figure 9 : famille de situations *via* des formes de raisonnement à un ensemble de caractéristiques de réponses, repérées par le chercheur. Modifié d'après L. Viennot, 1985, p. 153.

L. Viennot exprime l'existence d'une étroite relation entre une famille de situations (e.g. des questions posées aux étudiants) et certaines caractéristiques des productions des étudiants (e.g. leurs réponses aux questions). Cette relation repérée par le chercheur est sous-tendue par des modes de raisonnement ou conceptions, que l'on cherche à caractériser.

- **Importance du référentiel épistémologique du chercheur dans le travail d'inférence**

Deuxième point de vigilance : l'analyse des productions d'étudiants, en termes de conception, correspond à un travail d'inférence réalisé par le chercheur. L'expertise épistémologique de ce dernier vient « normer » l'analyse. Le repérage d'un ensemble de caractéristiques de réponses et la caractérisation d'un éventuel écart entre les réponses et les savoirs scientifiques de référence mobilisés ne sont pas neutres. En effet, un contenu de savoir donné peut se présenter de différentes façons : il n'y a pas une unique manière de caractériser un savoir dit de référence pour comparer aux productions des étudiants. L'image du paysage, pouvant être observée sous différents angles, proposée par L. Viennot et S. Rainson (1999), nous semble éloquente. Elle éclaire la question des différentes positions possibles du chercheur lors de l'analyse des productions :

> « The body of knowledge on which scholars agree at a given time could be regarded as a landscape which can be lit from different angles, observed from different perspectives and travelled by different paths. » (Viennot & Rainson, 1999, p. 2).

- **Importance de la caractérisation du mode de fonctionnement des conceptions et de leurs origines possibles**

Troisième point de vigilance : le travail du chercheur consiste à remonter au raisonnement des étudiants pour caractériser le mode de fonctionnement des conceptions, à ce qu'elles peuvent expliquer ou ne peuvent pas expliquer et, ainsi, déterminer leurs limites de validité. Caractériser le mode de fonctionnement, c'est identifier également les situations pour lesquelles une conception donnée constitue un outil, une aide pour pensée avec une certaine valeur explicative et prédictive, mais aussi les situations dans lesquelles elle devient un obstacle ou une cause d'inertie s'opposant au questionnement et à la problématisation.

Enfin, le travail du chercheur peut conduire à rechercher l'origine des conceptions, origine qui peut être variée. Comme nous l'avons vu précédemment, une conception peut être expliquée par la mise en jeu d'obstacles épistémologiques (e.g. obstacles substantialiste, pensée finaliste, raisonnement séquentiel).

Chez les enfants, il peut s'agir d'une limitation cognitive à un moment donné de leur développement (obstacle ontogénique). Par exemple, les travaux de la psychologie génétique de Jean Piaget ont montré que les jeunes enfants ne sont pas conservateurs (qu'il s'agisse de la matière, de la masse ou du volume) avec un primat à la perception sensorielle.

De même que certaines conceptions peuvent tirer leur origine de la forme particulière d'un enseignement scolaire, il d'agit alors d'un obstacle didactique. Nous aurons l'occasion d'y revenir lors de la présentation des résultats de notre enquête didactique (cf. p. 121).

D'autres facteurs peuvent expliquer une conception telle que l'ambiguïté du langage. Pour finir, nous citerons l'implication de valeurs, très présentes dans certains thèmes scientifiques.

1.4. Bilan sur notre position concernant la notion de conception

Nous utilisons la notion de conception pour désigner la logique sous-jacente qui explique les réponses des étudiants dans une situation donnée face à certains problèmes, une logique inférée par le chercheur. Il s'agit d'un modèle explicatif ayant une certaine zone de validité.

Deux cas de figures peuvent être distingués. Dans le premier, certaines conceptions mettent en jeu des connaissances « naïves » et un raisonnement de sens commun en décalage par rapport aux modèles construits par les scientifiques. Dans le second cas, d'autres conceptions

peuvent être en accord avec les savoirs acceptés par la communauté scientifique et constituent des façons alternatives de voir le monde, appropriées dans des contextes donnés (Driver, 1989). Par exemple, dans un autre champ disciplinaire que le nôtre, M. Artigue et J. Robinet caractérisèrent plusieurs conceptions du cercle chez des élèves de l'école élémentaire, qui sont valides mathématiquement, chacune étant plus appropriée à un type de situation donnée (Artigue & Robinet, 1982). Dans ce deuxième cas, les conceptions ne sont pas repérées par leur écart aux savoirs de « référence » mais par leur logique propre.

Dans tous les cas, les conceptions restent caractérisées par les connaissances et les formes de raisonnement qu'elles mobilisent. En ce sens, elles constituent des outils intellectuels au sens vygotskien. Les apprenants, en situation d'apprentissage, doivent donc les transformer pour s'approprier les savoirs scientifiques historiquement élaborés et en faire des outils pour agir-parler-penser dans un contexte scientifique. Les conceptions constituent alors un point d'appui incontournable pour les apprentissages mais elles peuvent simultanément se constituer en obstacle à cet apprentissage, puisque nous ne pouvons pas penser les apprentissages scientifiques sans obstacles.

Ce positionnement théorique sur les conceptions permet à présent de reformuler les questions de recherche pour cette enquête didactique, questions qui ont été esquissées à la fin du chapitre précédent.

2. Nouvelle formulation des questions de recherche

Sans en avoir forcément conscience, les étudiants qui se destinent à devenir professeurs de SVT ont été confrontés dans leur cursus universitaire à des usages scientifiques différents du concept de végétal selon les problèmes étudiés et les disciplines biologiques. L'enquête didactique cherche à identifier leurs conceptions relatives au groupe biologique des végétaux dans différentes situations de classification. Nos questions de recherche se décomposent en deux grandes catégories.

2.1. Identification des conceptions des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification, de leurs modes de fonctionnement et de leurs origines possibles

Dans le cadre d'une situation ouverte de classification pour laquelle le registre explicatif n'est pas imposé, quelles sont les espèces que les étudiants classent parmi les végétaux et pour

quelles raisons ? Quelles sont les caractéristiques utilisées par les étudiants pour définir le groupe des végétaux ?

Afin d'étudier le mode de fonctionnement des conceptions (cf. figure 8), nous nous attacherons à comprendre le type de problèmes qui justifient leur classification. Réalisent-ils une classification fonctionnelle ou phylogénétique pour regrouper des organismes au sein du groupe des végétaux, face à une collection d'espèces variées tant sur le plan fonctionnel que phylogénétique ?

Plus précisément, leur conception des végétaux vise-t-elle à répondre à un problème fonctionnel (problème physiologique : e.g. nutrition, locomotion, reproduction ; problème écologique) ou un problème structural (échelle cellulaire ou échelle de l'organisme) ou encore un problème phylogénétique ? La conception des végétaux des étudiants correspond-elle à un seul problème ou bien à plusieurs problèmes combinés ?

Sont-ils capables d'expliciter spontanément la tension relative à la polysémie du concept de végétal ?

Confrontés à des Eucaryotes unicellulaires qui posèrent problème au cours de l'histoire de la classification, comment les étudiants raisonnent-ils pour classer ces espèces vis-à-vis des végétaux ? Rencontrent-ils des difficultés particulières pour ces espèces ?

Enfin, nous porterons notre regard sur les réponses des étudiants afin d'examiner si elles font recours à des modes de raisonnement susceptibles d'exercer la fonction d'obstacle dans certaines situations.

2.2. Étude des logiques de réponses en fonction des situations et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique

Comme nous l'avons présenté précédemment, une conception est un couple associant la situation de production avec les réponses des étudiants. Cette position nous conduira à examiner la relation entre les réponses obtenues et la nature des questions, correspondant à différentes situations de classification : question ouverte suivie par une question résolument fonctionnelle à l'échelle écosystémique (problème écologique) et, enfin, par une question engageant un problème phylogénétique.

La comparaison des réponses à ces différentes questions devrait permettre de caractériser les limites de validité de leur conception.

Au cours du chapitre précédent, nous avons montré qu'il n'existe pas un unique concept de végétal, mais qu'il s'agit d'un concept polysémique : le groupe des végétaux présente des

contours différents selon la nature des problèmes étudiés. De plus, les classifications fonctionnelle et phylogénétique présentent certains principes spécifiques, la perte de la chlorophylle n'ayant pas les mêmes conséquences dans les deux cas.

Cette particularité conceptuelle est-elle source de difficultés pour les étudiants ?

Comment les étudiants gèrent-ils la dualité des logiques des classifications fonctionnelle et phylogénétique au regard d'une espèce problématique, une plante à fleurs parasite non chlorophyllienne (orobanche) ?

L'articulation de différents types de classification révèle-t-elle la mobilisation d'autres obstacles que ceux identifiés précédemment ?

Nos questions de recherche étant énoncées, présentons à présent la méthodologie mise en œuvre pour y répondre.

3. Méthodologie

Nous entendons tout d'abord développer la méthodologie de recueil des données, en présentant particulièrement le questionnaire que nous avons élaboré. Ensuite, nous présenterons la méthodologie d'analyse pour chacune des questions de recherche. À la fin de la section, un tableau récapitulera la méthodologie d'analyse des données.

3.1. Méthodologie de recueil des données par questionnaire

3.1.1. Étude à l'échelle nationale française

Cette recherche didactique est basée sur un questionnaire. Il constitue un outil de recueil de données permettant l'obtention d'un grand nombre de réponses en vue d'une recherche de régularités. Ce questionnaire a été diffusé à l'échelle nationale, à partir du réseau de formateurs d'enseignants qui compose l'Association pour la Formation des Professeurs de SVT (AFPSVT). Vingt-six universités françaises, réparties sur tout le territoire national ont répondu à notre enquête, soit la quasi-totalité des masters formant au métier d'enseignant de SVT (26 des 28 formations). La figure 10 localise ces différentes formations.

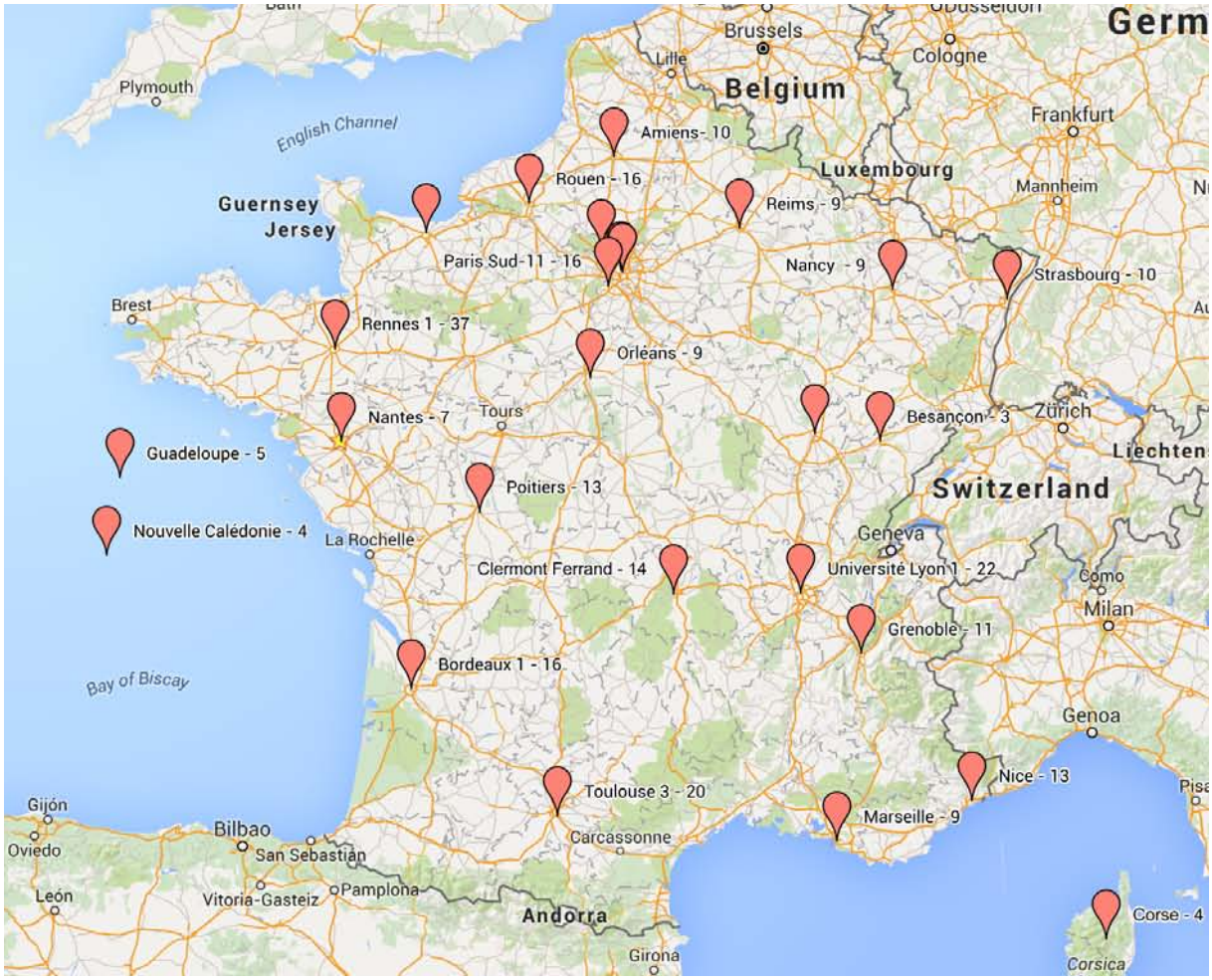


Figure 10 : carte de France indiquant la localisation des universités ayant participé à l'enquête et le nombre de réponses obtenues

Notre jeu de données se compose de 333 réponses d'étudiants en master 2 préparant le concours de recrutement (CAPES-CAFEP SVT). Ce public possède une relative homogénéité, dans le sens où le concours national représente un facteur d'uniformisation des contenus de biologie du master. La passation du questionnaire fut réalisée entre les mois de janvier et juin 2013, suivant les universités. Le nombre de réponses obtenues par formation est précisé dans la figure 11, variant de 3 à 37.

Université	Nombre	Université	Nombre
U. Rennes 1	37	U. Amiens	10
U. Paris 7 / UPEC	26	U. Strasbourg	10
U. Paris 6 - UPMC	26	U. Reims	9
U. Lyon 1	22	U. Nancy	9
U. Toulouse 3	20	U. Orléans	9
U. Paris Sud-11	16	U. Aix-Marseille 2	9
U. Bordeaux 1	16	U. Nantes	7
U. Rouen	16	U. Dijon	7
U. Clermont-Ferrand	14	U. Antilles – Guyane (Guadeloupe)	5
U. Poitiers	13	U. Caen	5
U. Nice	13	U. Corse	4
U. Cergy-Pontoise	12	U. Nouvelle Calédonie	4
U. Grenoble 1	11	U. Besançon	3
TOTAL : 333			

Figure 11 : nombre de réponses par université et aperçu de l'ensemble des 333 questionnaires reçus

Le questionnaire a été diffusé sous forme papier, ouvrant la possibilité aux étudiants de réaliser des dessins pour les questions ouvertes. Le format « papier–crayon » a considérablement alourdi le travail de dépouillement par rapport à une enquête en ligne en raison de la transcription manuelle des réponses. Mais il a permis de contrôler davantage les conditions de passation du questionnaire, réalisée en présence des formateurs. Nous tenions absolument à ce que le questionnaire soit rempli individuellement et sans aucun recours à des sources bibliographiques : manuel, internet ou cours de biologie. Cette consigne fut transmise aux formateurs ayant accepté de diffuser l'enquête à leurs étudiants. La durée moyenne de passation est de trente minutes. Le questionnaire comprend dix pages et il est présenté en annexe (cf. p. 517).

3.1.2. Présentation du questionnaire

Notre étude possède une double visée quantitative et qualitative :

- l'analyse statistique des données doit permettre de dégager des régularités dans les réponses des étudiants ;
- l'analyse qualitative de l'argumentation des étudiants offre l'occasion de préciser le raisonnement mis en jeu. Ce deuxième objectif rend nécessaire la présence de questions ouvertes permettant aux étudiants de construire une argumentation.

• Un questionnaire basé sur une enquête préalable

Le questionnaire a été élaboré sur la base des résultats d'une recherche didactique préliminaire, réalisée dans le cadre du mémoire de recherche de master 2 (Bosdeveix, 2011; Bosdeveix & Lhoste, 2014). Cette enquête fut réalisée en 2011 et elle portait sur un échantillon de 29 étudiants d'une seule formation de master 2 (Paris 7 – UPEC). Elle croisait trois techniques de recueil de données complémentaires : questionnaire, entretien semi-directif et carte heuristique.

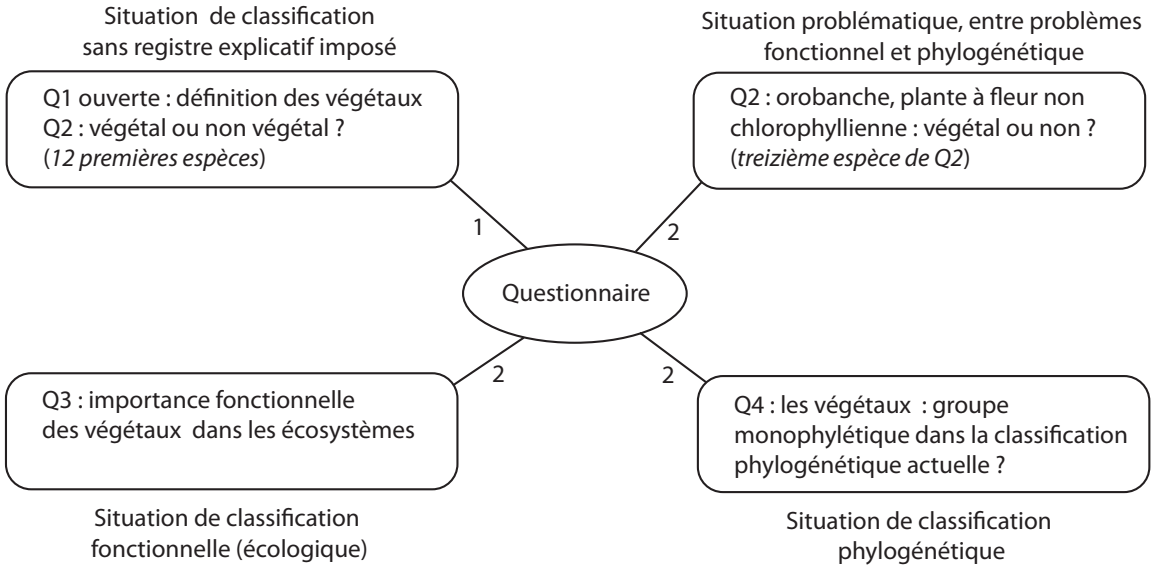
Face à une question ouverte de définition des végétaux, cette recherche exploratoire avait montré une tendance à limiter les végétaux aux seuls Eucaryotes photosynthétiques possédant des plastes, une paroi cellulaire. D'autres étudiants réduisaient les végétaux aux seules plantes terrestres (Embryophytes) ou même uniquement aux plantes à fleurs. Nous avions qualifié cette conception de « macrocentriste » puisque centrée sur les macro-organismes qui nous entourent au détriment de la biodiversité invisible (micro-organismes).

Les entretiens ont montré des difficultés à raisonner dans un cadre phylogénétique et à articuler leur raisonnement avec un problème fonctionnel de nutrition. Le cas, d'une orobanche, une plante à fleur parasite dépourvue de chlorophylle et ne réalisant pas la photosynthèse, s'est révélé être un exemple fécond de caractérisation du raisonnement des étudiants. De plus, à l'occasion d'une question ouverte, nous avons montré ce très faible recours spontané à l'échelle écosystémique pour caractériser les végétaux.

Le choix des questions a été opéré sur la base des résultats de cette enquête didactique exploratoire, ainsi que sur les résultats de la recherche épistémologique concernant le concept de végétal, présentés préalablement dans le chapitre 1.

• Les questions posées

Le questionnaire comprend quatre questions. La figure 12 présente la logique globale et met en relation les questions posées avec les deux grands objectifs de la recherche.



1 : inférence des conceptions des végétaux en tant que groupe biologique dans une situation ouverte
2 : étude des logiques de réponses en fonction des situations de classification et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique

Figure 12 : logique du questionnaire

- **Une situation « ouverte » de classification sans registre explicatif imposé**

La première question est délibérément ouverte. Elle vise l'obtention d'une première caractérisation argumentée des végétaux : « Définissez ce que sont les végétaux ». La seconde question correspond à treize espèces pour lesquelles les étudiants doivent indiquer si elles sont végétales. Ils ont trois réponses possibles : végétal (V), non végétal (NV) et ne sais pas (NSP). Ils sont invités à argumenter pour justifier leur réponse. Concernant cette seconde question, deux pistes seraient envisageables : ne donner que les noms des espèces et une illustration ou bien fournir des informations biologiques complémentaires. Nous avons opté pour le deuxième choix. Notre objectif n'est pas d'évaluer les connaissances que possèdent les étudiants sur un ensemble d'espèces mais d'identifier quel type de raisonnement les étudiants convoquent et quels caractères mobilisent-ils pour regrouper des espèces au sein du groupe des végétaux. Aussi, chaque espèce est illustrée par une photographie permettant la reconnaissance de l'espèce et l'observation de certains caractères structuraux.

Une liste de caractères cellulaires et physiologiques non visibles est indiquée permettant aux étudiants de conduire un raisonnement. Les caractères indiqués sont les suivants : mobilité, état uni ou pluricellulaire, caractère eucaryote ou non, présence et nature chimique de la paroi, présence de plaste et nombre de membranes plastidiales, type de nutrition (photosynthèse oxygénique ou non), type de reproduction (avec ou sans spore).

Fournir ces différentes informations n'est évidemment pas anodin. Cela contraint le raisonnement des étudiants en orientant leur réflexion sur ces différents caractères structuraux et fonctionnels. La problématisation élaborée par les étudiants peut donc s'appuyer sur ces contraintes, mais pas uniquement puisqu'ils ont la possibilité de compléter leur argumentation avec d'autres éléments empiriques et théoriques. Le choix des informations fournies a été réalisé pour leur permettre de mobiliser une diversité de raisonnements en relation avec les différents types de classification. Certains caractères ont été impliqués dans des rectifications de la classification biologique et de la nature systématique des végétaux.

La figure 13 présente l'exemple des informations indiquées pour l'une des espèces, *Ulva lactuca*. Notons que le groupe systématique est précisé pour chaque espèce ce qui permet d'utiliser leurs connaissances des taxons indiqués. Cependant, nous avons pris soin de ne pas choisir de noms de groupes se terminant par le suffixe « –phytes » (ou « phyta ») de manière à éviter des raisonnements simplistes associant uniquement les végétaux à la présence de cette seule information, masquant alors la logique de la classification dans laquelle s'insère ce groupe biologique.

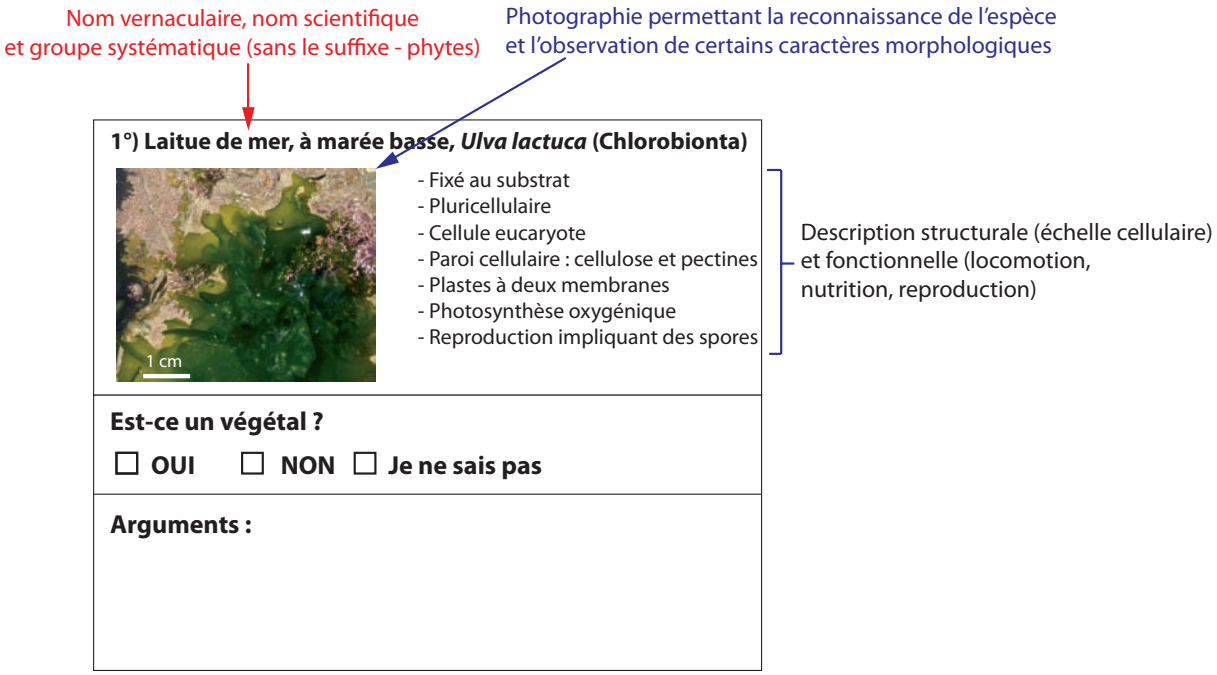


Figure 13 : informations fournies pour chaque espèce de la question 2

Les treize espèces ont été choisies en raison de leur grande diversité taxonomique, structurale et fonctionnelle, une diversité susceptible de donner lieu à une multiplicité de conceptions des végétaux que nous développerons de manière détaillée dans une prochaine section. La figure 14 présente les espèces dans l'ordre où elles furent soumises aux étudiants avec, pour chacune d'elle, la raison de son choix.

Figure 14 : les treize espèces de la question 2 et leur justification. Crédit photographique[28]

[28] **Crédits photographiques :** 2. Synechococcus, 5. Surirella : Y. Tsukii. Protist Information Server, URL: http://protist.i.hosei.ac.jp/

4. Euglena : "Euglenoid movement" by Rogelio Moreno. Licensed under Creative Commons Zero, Public Domain Dedication via Wikimedia Commons. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Euglenoid_movement.jpg#mediaviewer/File:Euglenoid_movement.jpg. Pour des raisons de droit, cette photographie remplace celle du questionnaire réellement distribué aux étudiants. L'euglène présentait alors un flagelle nettement observable (caractère important).

L'ordre des douze premières espèces cherche à mélanger les différents groupes systématiques. La treizième espèce (*Orobanche sp.*) est volontairement mise en dernière position en raison de sa fonction particulière dans notre étude. En effet, l'étude didactique exploratoire (2011) avait révélée que cette espèce posait d'importants problèmes aux étudiants, car dépourvue de chlorophylle, cet attribut étant habituellement associé aux végétaux.

La première question ouverte et les douze premières espèces de la seconde question constituent une première situation de classification à partir de la quelle nous pensons dégager une certaine cohérence de réponses, cohérence qui nous permet, pour chaque étudiant, d'inférer la conception des végétaux en tant que groupe biologique, conception mobilisée dans une situation ouverte, sans imposer de registre explicatif.

- **Une situation problématique, entre un problème fonctionnel et un problème phylogénétique : le cas d'une plante à fleurs non chlorophyllienne**

L'orobanche, placée en treizième et dernière place, constitue une nouvelle situation problématique qui permet d'analyser comment est prise en compte l'absence de chlorophylle chez une plante à fleurs. Notre recherche didactique préalable laisse à penser qu'un nouveau raisonnement peut être mobilisé dans cette situation qui pose un problème fonctionnel : l'absence de photosynthèse. L'analyse des réponses devrait permettre d'indiquer si l'argumentation reste de nature fonctionnelle, phylogénétique ou autre, et si elle laisse apparaître d'éventuelles dissonances entre les deux types de raisonnement classificatoire présentant des spécificités. La perte d'un attribut biochimique (chlorophylle) en lien avec une fonction (la photosynthèse) nous semble particulièrement propice pour révéler la nature de leur raisonnement dans une situation problématique, à l'interface de deux types de classifications.

- **Deux situations imposant un registre explicatif explicite (fonctionnel puis phylogénétique)**

Les deux dernières questions contrastent fortement et imposent explicitement un registre explicatif.

La question 3 reste de nature ouverte : « Quelle est l'importance fonctionnelle des végétaux dans les écosystèmes ? » Elle est résolument fonctionnelle (écologique) et se situe à l'échelle de l'écosystème.

10. Mus : Mary Mortreux (UMR BFA U. Paris 7). 1 Ulva, 7 Palmaria, 12 Polypodium, 13. Orobanche : Vincent Chassany (U. Paris 7). Autres photographies (3, 6, 8, 9, 11) : Robin Bosdeveix

La question 4 est la suivante : « Les végétaux constituent-ils un groupe systématique valide (c'est-à-dire monophylétique) dans la classification phylogénétique actuelle ? » Les étudiants ont trois réponses possibles : oui / non / je ne sais pas. Ensuite, ils sont invités à justifier leur réponse. Cette dernière question les conduit à raisonner dans un cadre phylogénétique, un cadre qu'ils pouvaient ne pas avoir envisagé jusque-là.

Ces deux dernières questions permettront d'évaluer les connaissances écologiques et phylogénétiques concernant le groupe des végétaux, et les comparer avec la logique de réponse mobilisée dans les deux situations précédentes afin de caractériser les limites de validité des conceptions et la manifestation de difficultés, voire d'obstacles.

Les données étant recueillies, envisageons maintenant la façon de les analyser pour répondre aux questions de recherche de cette enquête.

3.2. Méthodologie d'analyse des conceptions dans le cadre d'une situation ouverte de classification

L'analyse des conceptions est réalisée en trois étapes présentées en figure 15 :

1. Analyse *a priori* établissant plusieurs conceptions des végétaux sur la base d'une étude préalable (didactique et épistémologique). Ces catégories conceptuelles définies *a* priori sont des possibles, pas nécessairement mobilisées par notre échantillon de 333 étudiants de M2. Elles ne prétendent pas décrire la totalité des situations effectives. De plus, elles servent de base à la seconde étape de l'analyse dite supervisée, mais notre étude devra comprendre une dernière phase afin d'identifier d'éventuelles catégories supplémentaires.
2. Analyse supervisée visant à identifier et dénombrer les étudiants qui mobilisent chacune des conceptions définies préalablement par l'analyse *a priori*. L'identification des étudiants permettra d'étudier l'argumentation développée pour chaque conception et de confronter leurs réponses à celles des deux dernières questions (cf. deuxième objectif de recherche).
3. Analyse non supervisée consistant en une étude statistique dégageant des catégories émergentes. Cette étape présente un double objectif : examiner la validité des conceptions définies *a priori* en cherchant si ces groupes de réponses sont retrouvés par cette analyse inductive des données et vérifier si de nouveaux groupes de réponses apparaissent, impliquant une nouvelle étude pour en comprendre les fondements argumentatifs.

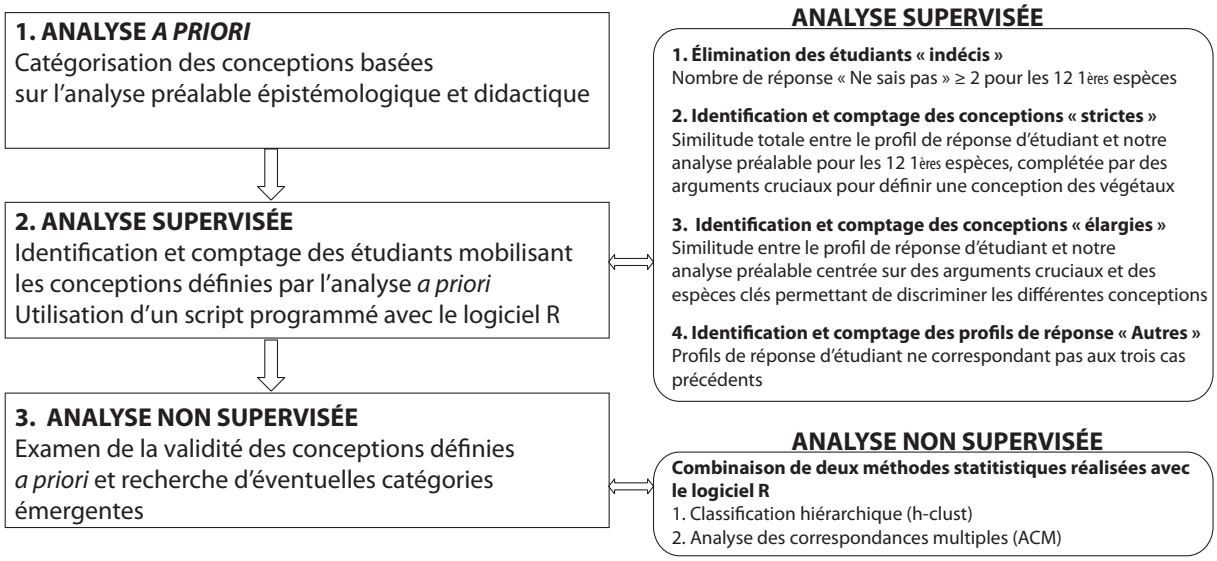


Figure 15 : étapes de l'analyse des données permettant

Nous développerons successivement la méthodologie qui correspond à ces trois étapes de l'analyse, mais, au préalable, nous débuterons par la présentation du codage des données brutes, codage à partir duquel les données seront ensuite analysées.

3.2.1. Codage des données brutes

Chaque réponse à la première question ouverte se trouve transcrite intégralement dans une feuille de calcul Excel. Cette transcription permet de disposer des réponses dans un seul fichier sans avoir à retourner dans les questionnaires papiers. Les illustrations réalisées par les étudiants sont photographiées.

Les arguments sont codés dans une seconde feuille de calcul qui utilise une grille de codage à cet effet. Cette dernière a été établie en amont de l'étude des questionnaires et intègre les arguments que l'on pensait rencontrer. Elle fut complétée au fur et à mesure du dépouillement des questionnaires, en cas d'arguments imprévus. Chaque caractère est codé par une lettre correspondant au thème et un numéro. Par exemple, la photosynthèse est appelée M1 puisqu'il s'agit du premier caractère du thème « Métabolisme ». Une synonymie des arguments fut établie de manière à éviter une multiplication excessive des codes. Ainsi le terme « phototrophie » est également codé M1 comme le terme « photosynthèse » ou « photosynthèse oxygénique ». Le codage entraîne une perte inévitable d'information, mais celle-ci se trouve contrôlée par notre connaissance du sujet (cf. référentiel épistémologique présenté en figure 8). Une argumentation par la négative est signalée par une étoile. Par exemple, l'absence de paroi devient C4* (C4 désignant la présence d'une paroi). Le tableau 2 présente un extrait de la grille de codage, disponible dans son intégralité en annexe 2.

Catégorie	Argument	Code
Organisation morpho-anatomique (O)	**Fixé au substrat / immobilité**	O1
	Thalle	O2
	Cormus / tige feuillée	O3
	Apparente immobilité (ou généralement fixé)	O4
	Justification "NV" sur la base de caractères (synapomorphies) d'un groupe [Ex : Yeux et bouche (Métazoaires) / Vertèbres (Vertébrés) / poils (Mammifères)] *[Aurait pu être codé en S également*]	O5
Organisation cellulaire (C)	**Pluricellulaire**	C1
	Cellule eucaryote	C2
	Vacuole	C3
	Paroi	C4
	Paroi pecto-cellulosique	C5
	Plastes (ou chloroplastes ou phéoplastes...)	C6
	Cellulose	C7
	Etc. (15 codes en tout)	Etc.
Métabolisme (M)	Cf. annexe 2, p. 527 (9 codes en tout)	
Reproduction et développement (R)	Cf. annexe 2, p. 527 (10 codes en tout)	
Systématique et évolution (S)	Cf. annexe 2, p. 527 (38 codes en tout)	
Écologie (E)	Cf. annexe 2, p. 527 (26 codes en tout)	
Inclusion ou exclusion (IN ou EX)	Argument d'exclusion Ex : "C'est un végétal car ce n'est pas un animal" (ou l'inverse)	EX
	Argument d'inclusion Ex : "C'est un végétal car c'est une Angiosperme."	IN
	Argument d'exclusion seul (sans autres arguments)	EXS
	Argument d'inclusion seul (sans autres arguments)	INS
Utilitaire (U)	Ressource pour l'Homme	U1
Enseignement (BV)	Végétal car étudié dans l'enseignement de biologie végétale	BV
Autre	Non justifié (pas d'arguments donnés pour justifier la réponse)	NJ
	Non codé (arguments confus ou hors-sujet)	NC

Tableau 2 : aperçu de la grille de codage. En gras : information fournie en question 2.

La structure de la feuille de calcul Excel dans laquelle sont saisies les données brutes est présentée dans le tableau 3. Chaque étudiant correspond à une colonne et chaque question à une ligne. C'est à partir de ce fichier que l'analyse des données est réalisée.

Questionnaire	**Étudiant 1**
Question 1	S2;M1;M3;C6;C3;C4;S26;O4;S17
Question 2	
Ulva	V
ArgumentsUlv	C4;C6;M1
Synechococcus	V
ArgumentsSyn	M1
Fucus	V
ArgumentsFuc	C4;C6;M1
Euglena	V
ArgumentsEug	C6;M1
Surirella	V
ArgumentsSur	C4;C6;M1
Halichondria	NV
ArgumentsHal	C4*;C6*;M1*
Palmaria	V
ArgumentsPal	C4;C6;M1
Andromeda	V
ArgumentsAnd	C4;C6;M1
Amanita	NV
ArgumentsAma	C6*;M1*
Mus	NV
ArgumentsMus	C4*;C6*;M1*
Larix	V
ArgumentsLar	C4;C6;M1
Polypodium	V
ArgumentsPol	C4;C6;M1
Orobanche	V
ArgumentsOro	C4;C6;S9
Question 3	E1;E4;E2;E6;E7;E8
Question 4	S2
ArgumentsSys	S3;S23

Tableau 3 : codage des données pour l'étudiant 1

Pour bien comprendre le processus de codage mis en œuvre, l'exemple de la réponse de l'étudiant 1 à la première question de définition des végétaux est proposé dans le tableau 4.

Réponse à la question 1 (ouverte)	**Codage**
Les végétaux sont des organismes qui forment un groupe non monophylétique, ils partagent cependant un ensemble de caractères communs :	S2
- ils font la photosynthèse oxygénique (ils sont photolithotrophes) + métabolisme secondaire riche	M1, M3
- ils possèdent des caractères cellulaires particuliers (chloroplastes, vacuole, paroi)	C6,C3,C4
- ils présentent pour beaucoup une immobilité.	O4
Ils regroupent la "lignée verte", mais aussi les Euglénophytes, Cryptophytes, Haptophytes, Chlorarachniophytes et un autre groupe qui m'échappe.	S17, S26

Tableau 4 : codage de la réponse à la première question de l'étudiant 1 (codes en annexe, p. 527)

3.2.2. Analyse *a priori* : catégorisation des conceptions des végétaux

L'analyse épistémologique, présentée lors du chapitre 1, ainsi que l'enquête didactique exploratoire menée en 2011 nous ont permis de définir plusieurs conceptions relatives aux végétaux en tant que groupe classificatoire. Ces conceptions correspondent à des catégories envisagées suite à notre analyse *a priori.* Elles sont à confronter à notre corpus de données.

Cinq types de conception des végétaux sont distingués : la conception par opposition (CPO), la conception fonctionnelle (CF), la conception fonctionnelle et cellulaire (CFC), la conception fonctionnelle macrocentrée (CFM) et la conception phylogénétique réduite (CPR). Elles sont présentées dans le tableau 5 sur la base des problèmes possiblement mobilisés pour chaque conception ainsi que le mode de raisonnement hypothétique sous-jacent dont le recours à d'éventuels obstacles.

Conception des végétaux	Problème(s) possiblement mobilisé(s)	Mode de raisonnement hypothétique et obstacles	Remarques
Conception par opposition (CPO) « Organismes non animaux » (incluant les champignons)	- Problème fonctionnel de locomotion (immobilité) et éventuellement de reproduction (spores) - et/ou problème cellulaire (présence d'une paroi) - Ou définition propositionnelle aproblématique	- Pensée catégorielle (catégories exclusives) [Définition par opposition aux animaux] - Mobilisation de la classification traditionnelle [règnes animal et végétal] - Attachement aux disciplines historiques [botanique incluant la mycologie *vs* zoologie]	
Conception fonctionnelle (CF) « Tous les organismes photosynthétiques »	Problème fonctionnel de nutrition (photosynthèse) associé à un problème écologique (production primaire)	Classification biologique fonctionnelle et non phylogénétique [un groupe fonctionnel des organismes partageant une même fonction, ici la photosynthèse]	Pas d'attachement à la structure cellulaire [inclusion des cyanobactéries]
Conception fonctionnelle et cellulaire (CFC) « Eucaryotes photosynthétiques pourvus de plastes »	Deux problèmes superposés : - problème fonctionnel de nutrition (photosynthèse) - problème cellulaire : présence d'un noyau et d'organites dont les plastes	Conception prototypique de « la » cellule végétale	Sous catégories : Eucaryotes - avec plastes et paroi - avec plastes et paroi pecto-cellulosique
Conception fonctionnelle macrocentrée (CFM) « Macro-organismes pluricellulaires photosynthétiques »	Deux problèmes superposés : - problème fonctionnel de nutrition (photosynthèse) - problème morpho-anatomique (structure de l'organisme) éventuellement associé à un problème fonctionnel spécifique aux plantes terrestres	Macrocentrisme [Centration sur les macro-organismes pluricellulaires, voire même uniquement sur les plantes terrestres qui nous entourent, les Embryophytes au détriment des micro-organismes]	Sous catégories : - Organismes pluricellulaires [Macro-algues et Embryophytes (CFM1)] - Organismes possédant une tige feuillée (cormus) [Embryophytes (CFM2)] Ce 2^{e} cas conduit à répondre que les végétaux sont monophylétiques.

Conception phylogénétique réduite (CPR) « Une lignée valide dans la classification phylogénétique, la lignée verte (ou Archaeplastida) »	Problème phylogénétique [un groupe rassemble un ancêtre commun et tous ses descendants partageant des attributs à l'état dérivé]	Classification biologique phylogénétique et non fonctionnelle	Partage d'un plaste à deux membranes issu d'une endosymbiose primaire. Exclusion de certaines lignées photosynthétiques non apparentées (comme les algues brunes)

Tableau 5 : présentation des cinq conceptions envisagées par l'analyse *a priori*

Délibérément, nous n'envisageons pas de conception utilitaire et anthropocentrée des végétaux. En effet, la nature de la seconde question, à partir de laquelle sont inférées les conceptions en complément de la première question ouverte, ne prête pas à répondre de façon utilitaire. La diversité des espèces proposées n'appelle pas à répondre en rapport avec l'espèce humaine. Une conception étant, pour nous, un système explicatif fondé sur un couple associant les questions posées avec les réponses, la nature de notre questionnaire ne prête pas à envisager une telle conception utilitaire, qui aurait pu éventuellement apparaître dans un autre contexte.

Par ailleurs, nous n'envisageons pas de conception strictement cellulaire, indépendante de tout problème fonctionnel. Ce choix, discutable, résulte des résultats de l'enquête didactique exploratoire qui n'avait pas donné à voir de telle conception et qui avait montré l'importance accordée par les étudiants à la photosynthèse. Mais l'étude de l'argumentation conduite par les étudiants ainsi que l'analyse non supervisée devraient permettre de caractériser d'éventuelles conceptions non envisagées dans cette analyse *a priori*, dont une conception strictement cellulaire et indépendante de la photosynthèse.

Les cinq conceptions se distinguent selon les problèmes auxquels elles permettent de répondre et le mode de raisonnement impliqué. Nous les présentons à présent afin de mieux comprendre les fondements de chaque conception.

- **Diversité des problèmes et conceptions des végétaux**

Les problèmes susceptibles d'intervenir dans les conceptions concernant les végétaux sont les suivants :

➢ **Problème fonctionnel de locomotion**

Certains organismes sont mobiles, d'autres ne le sont pas, tout au moins en apparence, car il peut exister des structures spécialisées de dissémination. Rappelons que ce problème était à

l'origine de la distinction historique entre animaux et végétaux, associé à une apparente insensibilité.

- **Problème fonctionnel de reproduction**

L'implication de spores dans le cycle de reproduction peut constituer un critère de classification qui justifie le regroupement des champignons au sein des végétaux (au sens traditionnel).

- **Problème fonctionnel de nutrition**

Certains organismes se nourrissent par photosynthèse. Ils peuvent alors être regroupés au sein des végétaux, dans un sens fonctionnel, tant au niveau physiologique qu'au niveau écologique.

- **Problème cellulaire (problème structural à l'échelle cellulaire)**

La structure cellulaire (associée à des fonctions spécifiques) peut constituer des critères de classification. Citons notamment le caractère eucaryote, la présence de plastes, d'une paroi cellulaire et sa nature biochimique : cellulose, pectines, agar-agar, alginates, carraghénanes, silice, carbonates, etc.

- **Problème morpho-anatomique (problème structural à l'échelle de l'organisme)**

L'organisation structurale de l'organisme permet de catégoriser les organismes selon leur morphologie et leur anatomie. Par exemple, la présence d'une tige feuillée chez les plantes terrestres est un critère permettant le regroupement d'organismes aériens. Naturellement, ces structures restent liées à un fonctionnement spécifique auquel certains étudiants s'attachent pour établir leur classification, comme par exemple la présence d'une circulation de sève au sein de tissus conducteurs chez les plantes vasculaires.

- **Problème phylogénétique**

Ce type de problème est caractéristique d'une classification phylogénétique. Une conception des végétaux fondée sur un problème historique regroupe des espèces apparentées qui partagent des caractères homologues à l'état dérivé. Ce type de problème fonde la conception phylogénétique réduite qui restreint les végétaux à un groupe monophylétique valide dans la classification actuelle. Ce problème phylogénétique peut être mobilisé par la conception fonctionnelle macrocentrée 2 (CFM2) limitant les végétaux aux Embryophytes. L'étude des réponses à la question 4 phylogénétique permettra de le déterminer.

Notons qu'une conception peut combiner plusieurs problèmes comme, par exemple, la conception fonctionnelle et cellulaire.

Certaines conceptions peuvent ne pas être problématisées mais reposer uniquement sur des modes de raisonnement commun. Ainsi, une conception par opposition pourrait être fondée sur la mobilisation d'une pensée catégorielle et/ou l'attachement aux deux règnes historiques, ainsi qu'à l'existence d'une discipline : la botanique, incluant traditionnellement la mycologie.

- **Diversité des modes de raisonnement**

Explicitons certaines formes de raisonnement de sens commun, possiblement mobilisés et utilisés dans notre catégorisation.

➢ **La pensée catégorielle**

Les végétaux sont définis comme une catégorie exclusive en opposition à une autre catégorie : celle des animaux. Pour Astolfi & Peterfalvi (1993, p. 110), l'usage de la pensée catégorielle peut renvoyer à « la "pensée par couples" ("ou bien ... ou bien ...") : le vivant/le non-vivant, les gaz/pas les gaz ». Nous proposons d'ajouter à cette liste de couples, le couple végétaux/animaux.

➢ **La pensée prototypique**

L'étude didactique exploratoire avait révélé l'existence d'un mode de raisonnement établi sur un exemple prototypique. La figure 16 présente un exemple de réponse comparant une cellule végétale et une cellule animale. L'étudiante qui l'a formulé s'est attachée à une différence de forme de cellule : les cellules végétales seraient hexagonales alors que les cellules animales seraient ovales. Cette réponse semble pouvoir être interprétée comme le reflet d'un mode de pensée prenant comme exemple prototypique la cellule du parenchyme palissadique foliaire. De nombreux autres types cellulaires ne présentent pas du tout cette morphologie : cellule de garde stomatique, cellule vasculaire xylémienne, poil absorbant, etc.

Forme hexagonale :
pensée prototypique basée sur un type cellulaire particulier

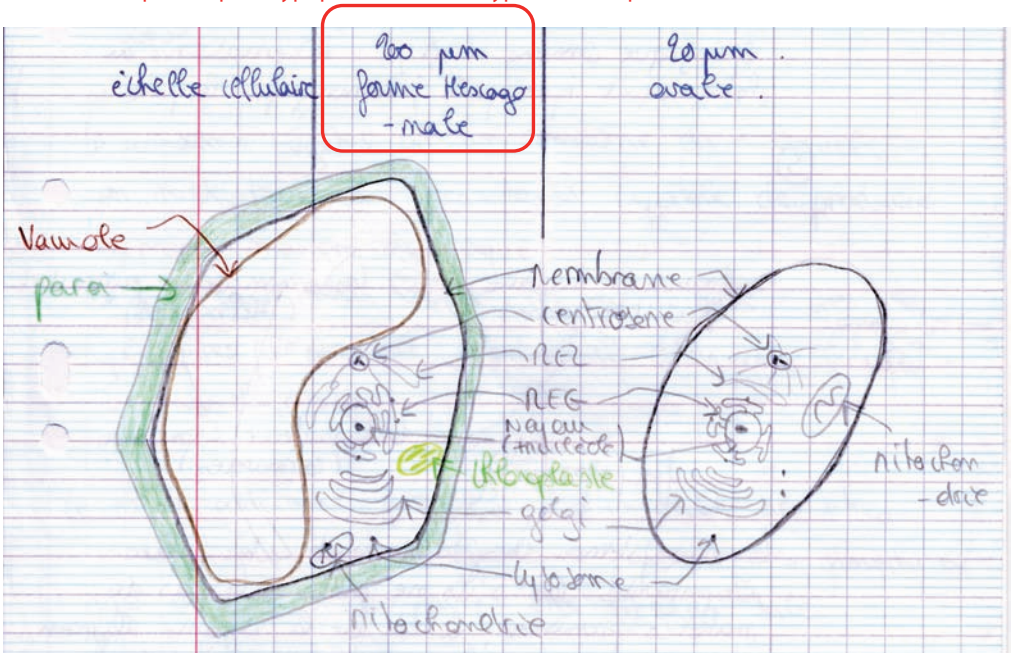


Figure 16 : comparaison d'une cellule végétale (à gauche) et d'une cellule animale (à droite), réalisée par une étudiante lors de l'enquête exploratoire (2011)

Les travaux de psychologie cognitive définissent le prototype comme « le meilleur exemplaire ou encore la meilleure instance, le meilleur représentant ou l'instance centrale d'une catégorie » (Kleiber, 1990, p. 47-48). Il renvoie au concept de typicalité. Des expériences ont montré que « les exemplaires typiques sont les plus rapidement sélectionnés et les plus vite dénommés dans des épreuves de temps de réaction » (Cordier, 1986, p. 63).

- **Le macrocentrisme (2014)**

Ce mode de raisonnement conduit à se focaliser sur les macro-organismes pluricellulaires en excluant les micro-organismes, voire même en se centrant sur les seules Embryophytes (plantes terrestres) ou encore les plantes à fleurs. Le macrocentrisme s'exprime à des degrés variables. Nous proposons de distinguer deux sous-conceptions fonctionnelles macrocentrées : une première (notée CFM1) incluant les macro-algues et restreignant les végétaux aux macro-organismes photosynthétiques et une seconde (notée CFM2) restreinte aux seules plantes terrestres.

3.2.3. Analyse supervisée

L'analyse supervisée entend identifier et dénombrer les étudiants correspondant à chacune des conceptions que nous avons définies. L'inférence des conceptions est basée sur les réponses à la première question ouverte de définition des végétaux et celles concernant les douze

premières espèces de la seconde question, pour lesquelles nous avons quelques raisons de penser que les étudiants auront une cohérence de réponse. Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'orobanche (la treizième espèce) n'est pas prise en compte à ce stade de l'analyse. Les réponses concernant cette espèce clé sont analysées dans un second temps pour répondre à la seconde grande question de recherche.

L'analyse supervisée a été réalisée avec le logiciel libre R. Celui-ci est à la fois un langage informatique et un environnement qui permet le traitement et l'analyse statistique des données. Le script fut élaboré en partenariat avec Leslie Regad, biostatisticienne et bioinformaticienne à l'UMR-S 973 Université Paris Diderot-Inserm MTi (Molécules Thérapeutiques *in silico*). Le script, bien trop long pour figurer dans ce manuscrit doctoral, est disponible à la demande.

Les quatre étapes de l'analyse supervisée sont les suivantes (cf. figure 15, p. 91) :

- **Étape 1 : Élimination des étudiants nommés « indécis »**

Cherchant à caractériser des cohérences de raisonnement, nous avons décidé de ne pas considérer pour l'analyse les étudiants qui ne se sont pas prononcés deux fois (ou plus) sur les douze premières espèces (nommés étudiants « indécis »). Nous serons conduits à examiner l'argumentation de certains de ces étudiants ne se prononçant pas pour certaines espèces en raison des multiples définitions possibles du groupe des végétaux.

- **Étape 2 : Recherche des conceptions « strictes »**

Le tableau 6 présente de manière détaillée le mode de caractérisation des conceptions que l'on qualifie de « strictes ». Que l'on se comprenne bien : ce qui est « stricte » ne concerne pas la conception mais notre façon de l'identifier. Pour chacune des conceptions définies *a priori*, nous définissons un profil de réponses pour les douze premières espèces jugées conforme à notre définition des cinq conceptions (cf. tableau 5). Par exemple, la cyanobactérie *Synechococcus* n'est végétale que pour la conception fonctionnelle. L'algue brune *Fucus* est végétale pour toutes les conceptions, sauf la conception phylogénétique réduite, limitée à la lignée verte (ou Archaeplastida). Afin de nous assurer que notre inférence correspond bien avec une conception donnée, nous ajoutons certaines conditions supplémentaires de façon à contraindre davantage notre inférence par l'utilisation des arguments liés à la première question. Par exemple, pour la conception fonctionnelle « stricte », l'étudiant ne doit pas indiquer que les végétaux sont des Eucaryotes ou bien qu'ils possèdent des plastes.

Conception stricte (s)	**Conception fonctionnelle stricte CFs**	**Conception fonctionnelle et cellulaire stricte CFCs**	**Conception par opposition stricte CPOs**	**Conception fonctionnelle macrocentrée stricte CFMs**	**Conception phylogénétique réduite stricte CPRs**
Signification de la conception	Tous les organismes photosynthétiques	Eucaryotes photosynthétiques pourvus de plastes	Organismes non animaux (incluant les champignons)	Macro-organismes pluricellulaires photosynthétiques	Une lignée valide dans la classification phylogénétique, la lignée verte (Archaeplastida)
Ulva Chlorobionte	V	V	V	V	V
Synechococcus Cyanobactérie	V	NV	NV	NV	NV
Fucus Straménopile	V	V	V	V	NV
Euglena Euglénobionte	V	V	NV	NV	NV
Surirella Diatomée	V	V	NV	NV	NV
Halichondria Spongiaire	NV	NV	NV	NV	NV
Palmaria Rhodobionte	V	V	V	V	V
Andromeda Angiosperme	V	V	V	V	V
Amanita Basidiomycète	NV	NV	V	NV	NV
Mus Mammifère	NV	NV	NV	NV	NV
Larix Gymnosperme	V	V	V	V	V
Polypodium Fougère	V	V	V	V	V
Arguments à la question 1	Pas de mention du caractère eucaryote ou de la présence de plastes	Eucaryote ou présence de plastes		Eucaryote ou présence de plastes **Et** Organisme pluricellulaire	Eucaryote ou présence de plastes

Tableau 6 : mode d'identification des conceptions strictes permettant de programmer le script R

- **Étape 3 : Recherche des conceptions « élargies »**

La méthode précédente étant très restrictive, beaucoup d'étudiants risquent de ne pas être catégorisés dans les conceptions dites « strictes ». Il suffit, par exemple, d'une réponse NSP (ne sais pas) pour que l'étudiant ne soit pas considéré avec le protocole d'identification précédent. Nous avons donc défini de manière « élargie » les cinq types de conceptions sur la base d'espèces clés et de caractères décisifs (cf. tableau 7). Nous avons considéré comme conception fonctionnelle élargie toute réponse qui mobilise la photosynthèse ou l'autotrophie

dans la première question, qui inclut la cyanobactérie *Synechococcus* et exclut le champignon *Amanita* en question 2, quelles que soient les réponses fournies pour les autres espèces.

	Conception fonctionnelle CF	**Conception fonctionnelle et cellulaire CFC**	**Conception par opposition CPO**	**Conception fonctionnelle macrocentrée CFM1**	**Conception fonctionnelle macrocentré CFM2**	**Conception phylogénétique réduite CPR**
Signification de la conception	Organismes photosynthé- - tiques	Eucaryotes photosynthé- -tiques (avec plastes)	Groupe incluant les champignons	Eucaryotes pluricellulaires photosynthé- - tiques	Plantes terrestres (Embryophytes)	Lignée verte = Archaeplastidae
Arguments	Q1 : Photosynthèse ou autotrophie	Q1 : Photosynthèse ou autotrophie; eucaryote ou plastes	-	Q1 : Photosynthèse ou autotrophie; eucaryote ou plastes		
				Q1 : pluricellulaire ou Q2 : unicellulaire pour exclure Eug ou Sur	-	-
Espèces végétales	Syn.	Ulva	Amanita	Fucus; Ulva	-	Ulva
Espèces non végétales	Amanita	Syn.; Amanita	-	Syn.; Eug; Sur	Syn.; Eug; Sur ; Fucus; Ulva	Syn.; Eug; Sur ; Fucus

Tableau 7 : mode d'identification des conceptions élargies permettant de programmer le script R
Avant de réaliser le script sous R, nous avons vérifié que la plante à fleurs (*Andromeda*), contrôle positif, est bien considérée comme végétale par tous les étudiants. Il est donc inutile de l'ajouter comme condition nécessaire dans le script. Légende : Syn : Synechococcus (cyanobactérie) ; Eug : Euglena ; Sur : Surirella (diatomée)

Pour définir ce mode d'identification des conceptions dites « élargies », il nous a fallu vérifier qu'aucun étudiant n'était identifié comme mobilisant deux conceptions. Une première version de notre script d'identification ayant affecté à certains étudiants les deux conceptions CFC et CFM2, nous avons été amené à ajouter des conditions supplémentaires pour éviter le chevauchement entre deux conceptions. Aussi, il a été précisé que la conception fonctionnelle et cellulaire doit définir Ulva comme végétale contrairement à la conception fonctionnelle macrocentrée 2 (CFM2, réduite aux Embryophytes). Un autre changement fut apporté à la première version du protocole d'identification. Pour être identifié comme mobilisant la CFM1, l'étudiant doit indiquer en question 1 que les végétaux sont pluricellulaires (codé C1) ou bien doit justifier l'exclusion des Eucaryotes unicellulaires par leur unicellularité (codé C1*).

- **Étape 4 : Catégorisation « Autre »**

Les étudiants non indécis, dont les réponses ne correspondent ni au protocole d'identification des conceptions « strictes » ni aux conceptions « élargies », sont catégorisés comme « Autre ». Ceux-ci peuvent mobiliser l'une des cinq conceptions *a priori* mais ne pas être

catégorisés parmi elles en raison de notre protocole. L'identification implique que l'étudiant formule certains arguments clés en question 1. Par exemple, si l'un d'entre-eux mobilise la conception fonctionnelle et cellulaire dans la seconde question, en excluant la cyanobactérie *Synechococcus* car procaryote, mais qu'il ne mentionne pas le fait que les végétaux sont Eucaryotes ou ont des plastes dans la première question, alors il ne sera pas identifié comme CFC. Il s'agit là d'une limite de notre méthodologie d'inférence des conceptions, basée sur l'importance de l'explicitation de certains caractères que l'on juge décisif, et sur la prise en considération des réponses aux deux premières questions.

D'autre part, certains étudiants peuvent être catégorisés comme « Autre » en raison du changement de mode de raisonnement au fur et à mesure de la rencontre de nouvelles espèces. La définition initiale des végétaux est mise à l'épreuve des caractères des treize espèces différentes qui peuvent conduire l'étudiant à modifier sa vision initiale des végétaux. Dans ce cas, le profil « Autre » correspond à une conception ayant un domaine de validité très réduit.

Enfin, l'existence d'étudiants « Autre » peut correspondre à une nouvelle conception émergente, non envisagée lors de notre analyse *a priori*.

L'étude non supervisée contribuera à distinguer ces différents cas de figure.

3.2.4. Analyse non supervisée

Une étude non supervisée permet de dégager des catégories émergentes de manière inductive. Notre objectif principal reste la comparaison de ces catégories émergentes à nos catégories définies grâce à l'analyse *a priori* qui permet l'examen de leur validité. En effet, si une conception définie par l'analyse *a priori* est retrouvée par l'étude statistique non supervisée, alors elle se trouve renforcée. Cette étude permettra également de révéler d'éventuels sous-groupes parmi les cinq conceptions, sous-groupes qu'il nous faudra expliquer. En dernier lieu, cette étude cherche à examiner la catégorie « Autre » afin de savoir si elle comprend de nouvelle conception non anticipée.

Nous utiliserons deux méthodes de statistiques descriptives complémentaires qui sont adaptées à un jeu de données comportant de nombreuses variables : la classification hiérarchique (*hierarchical clustering* notée h-clust) et l'analyse des correspondances multiples (ACM).

Ces deux méthodes doivent être appliquées sur un tableau disjonctif dans lequel chaque variable qualitative est codée par 0 ou 1. Ce tableau est établi à partir des réponses aux douze premières espèces de la question 2. Cette étude ne prend donc pas en compte les réponses à la première question ouverte non adaptée à ce type d'analyse.

Pour produire ce tableau disjonctif complet, nous devons transformer le tableau initial qui comporte douze variables qualitatives (les différentes espèces) décrites par trois modalités : « végétal » (V), « non végétal » (NV) et « ne sais pas » (NSP). Un script est programmé avec R pour que chaque variable à trois modalités soit transformée en trois variables binaires (codées en 0 ou 1). Nous passons donc de douze variables (les espèces) à trente-six variables. Par exemple, pour la variable « Ulva » de départ, nous obtenons trois variables : « Ulva_V », « Ulva_NV » et « Ulva_NSP ». La variable « Ulva_V » est affectée de la valeur 1 si l'étudiant a répondu que l'espèce *Ulva* est végétale, sinon la valeur devient 0. Il en est de même pour les deux autres variables d'*Ulva*. Nous obtenons un tableau qui comporte les étudiants en ligne et les trente-six variables binaires en colonne.

C'est à partir de ce tableau disjonctif que sont réalisées la classification hiérarchique et l'analyse des correspondances multiples (ACM). Expliquons dès à présent ces deux méthodes statistiques ce qui permettra de comprendre leurs fondements, leurs intérêts et leur complémentarité.

- **La classification hiérarchique (h-clust)**

Une classification hiérarchique ascendante est un type de classification automatique qui vise à répartir les individus en groupes, chaque groupe devant être le plus homogène possible et les groupes devant être les plus différents possibles entre eux. La hiérarchie s'appuie sur le calcul de distances Chi2 entre individus et une méthode d'agrégation qui permet de créer les groupes. Pour étudier la robustesse de la classification obtenue, nous avons confronté deux méthodes d'agrégation différentes, nommées Average et Ward. La classification hiérarchique permet d'obtenir un arbre de similitude, appelé dendrogramme. Cette méthode offre la possibilité de générer des groupes que nous pourrons comparer aux différentes catégories conceptuelles, en colorant chaque étudiant avec la couleur correspondante à la conception qui lui a été assignée par l'analyse supervisée.

- **L'analyse des correspondances multiples (ACM)**

L'ACM est une méthode d'analyse multidimensionnelle de description graphique d'un jeu de données caractérisé par des variables qualitatives. Contrairement à un jeu de données décrit par deux ou trois variables pouvant être aisément représentées graphiquement, la représentation de la diversité des données décrites par un nombre élevé de variables (36 dans notre cas) implique la mise en œuvre d'une méthode statistique descriptive. La réalisation d'une analyse des correspondances multiples oblige le calcul de nouvelles variables continues

et non corrélées à partir des variables initiales du tableau disjonctif. Ces nouvelles variables sont appelées composantes principales. La première composante rend compte du maximum de la variabilité des données. Les données peuvent être explorées dans un espace à dimensions restreintes à partir de la sélection d'un nombre réduit de composantes principales, celles-ci expliquant une part significative de la variabilité des données. L'ACM produit une représentation graphique qui représente la projection des variables et des individus dans le nouvel espace constitué des composantes sélectionnées. Elle permet l'étude (i) des relations entre les variables et leurs différentes modalités, (ii) celles entre individus, et (iii) d'associer les groupes d'individus aux variables et à leurs modalités.

Cette méthode reste complémentaire de la classification hiérarchique. Elle possède l'avantage d'établir des groupes sur la totalité de la variabilité entre les données, mais toutefois, sans expliquer les groupes.

Il est donc utile de croiser ces deux méthodes d'analyse statistique.

3.2.5. Analyse de la formulation spontanée de la tension relative à la polysémie du concept de végétal

Comme nous l'avons précédemment montré, le concept de végétal est pluriel. Définir les végétaux n'est donc pas chose aisée lorsqu'il s'agit de répondre à la première question ouverte du questionnaire. Malgré que celle-ci n'appelle pas explicitement à formuler différentes définitions du concept, elle laisse la possibilité aux étudiants de le faire. On voit là tout l'intérêt de recenser et de dénombrer les réponses qui explicitent, spontanément, la pluralité du concept de végétal. Cette spontanéité nous apparaît être un indicateur d'un recul certain sur le concept de végétal.

3.2.6. Analyse relative à la place des micro-organismes eucaryotes

Comme nous l'avons présenté succinctement au cours du premier chapitre, la place des micro-organismes eucaryotes a été l'objet de rectifications importantes à la fin du XIX^{e} siècle et au cours du XX^{e}, ce qui entraîna des changements importants concernant l'extension du groupe des végétaux. Longtemps, ils ont formé le groupe des Protista, aujourd'hui remis en cause dans les phylogénies. Afin d'étudier comment les étudiants classent ces micro-organismes eucaryotes vis-à-vis des végétaux et s'ils rencontrent des difficultés particulières pour ces espèces, nous proposons deux types d'analyse complémentaires.

- **Étude de l'occurrence de réponses NSP par espèce**

Deux espèces d'Eucaryotes unicellulaires ont été présentées aux étudiants en question 2 : *Euglena* et *Surirella*, une diatomée. Nous émettons l'hypothèse que ceux-ci ont davantage de difficultés à classer ces organismes par rapport aux végétaux. La comparaison du nombre de réponses NSP (ne sais pas) entre ces deux espèces et les autres nous permettra d'examiner la validité de cette hypothèse.

- **Étude du recours à un argument d'emboîtement par espèce**

Les classifications biologiques restent le plus souvent hiérarchiques. Cette hiérarchie peut se traduire par l'emboîtement de groupes, exprimant leur inclusion, ou par un non-emboîtement et, dans ce cas, par leur exclusion. Un codage spécifique a été défini et permet d'indiquer si l'argumentation fait recours à un raisonnement par emboîtement. Un raisonnement d'inclusion (codé IN) est du type : « *Les angiospermes sont les plantes à fleurs, donc des végétaux* ». À l'inverse, un raisonnement d'exclusion (codé EX) se traduit par exemple par une formulation du type : « *Ce n'est pas un végétal, car c'est un animal* ». Le raisonnement par inclusion ou par exclusion est représenté dans la figure 17.

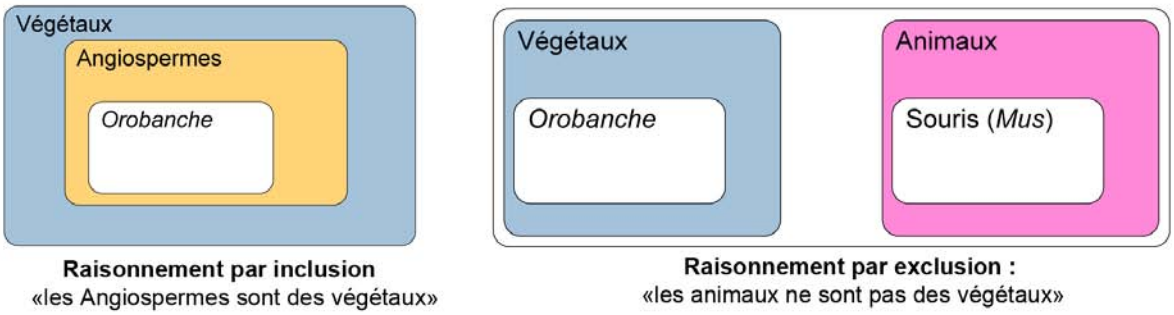


Figure 17 : raisonnement par inclusion et exclusion

Ce type de raisonnement que nous nommerons « par emboîtement » devrait s'exercer pour des groupes dont la validité est reconnue par un étudiant. Il semble vraisemblable que le recours à ce type de raisonnement soit plus important pour les espèces ne posant pas de difficultés de classification aux étudiants. De manière à étudier cette hypothèse, l'occurrence des arguments d'emboîtement (IN et EX) sera comparée pour les différentes espèces de la question 2 ce qui permettra d'examiner s'il est plus faible pour les deux espèces eucaryotiques unicellulaires que pour les autres.

3.2.7. Étude des obstacles mis en jeu

Pour pouvoir étudier la mise en jeu de certaines formes de raisonnement pouvant faire obstacle, certains arguments ont été codés, ce qui permet un comptage plus aisé.

C'est le cas du recours à une hiérarchie au sein du vivant, en lien avec l'Échelle des Êtres (codé S20) distinguant les végétaux (ou plantes) supérieures et inférieures.

Nous avons également codé le recours à une argumentation fondée sur la couleur verte de l'organisme, attribuant à cette seule couleur la présence de chlorophylle (codé M5). Ce choix résulte de l'enquête exploratoire dans laquelle un étudiant expliquait durant un entretien individuel que « les algues rouges et brunes ne sont pas vertes, or la chlorophylle est verte donc les algues rouges et brunes ne sont pas chlorophylliennes » (Ibid.). Astolfi & Peterfalvi (1993, p. 109) parlent de l'obstacle « primat de la perception sur la conceptualisation », qui semble correspondre à ce cas de figure. De façon corrélée, notre regard se portera sur la compréhension des étudiants en ce qui concerne l'expression « lignée verte » qui désigne un groupe comprenant notamment les algues rouges.

De plus, est codé BV l'argument consistant à considérer comme végétal une espèce qui a été étudiée dans les enseignements de biologie végétale à l'université.

Nous aurons l'occasion d'examiner les conceptions par opposition (CPO) puis fonctionnelle et cellulaire (CFC) et, enfin, fonctionnelle macrocentrée (CFM), cela dans le but d'analyser respectivement l'argumentation catégorielle, la pensée prototypique et le macrocentrisme.

Enfin, lors du dépouillement des questionnaires, nous recenserons toute réponse pouvant être interprétée en lien avec la mise en jeu d'un obstacle.

Présentons maintenant la méthodologie concernant notre deuxième famille de questions de recherche, famille qui porte sur la relation entre les réponses obtenues et la nature des questions correspondant à différentes situations de classification.

3.3. Méthodologie d'analyse de la relation entre les logiques de réponses et les types de classification

3.3.1. Analyse de la relation entre les logiques de réponses et les types de classification

Les deux dernières questions imposent un registre explicatif écologique puis phylogénétique, que les étudiants pouvaient ne pas avoir mobilisé lors de la première situation ouverte de classification. Nous analyserons successivement les réponses à ces deux dernières questions, ensuite nous comparerons les réponses avec celles obtenues initialement.

Concernant le registre écologique, nous dénombrerons le nombre d'arguments abordés dans la première question ouverte et nous mènerons une comparaison avec les réponses données en question 3, de manière à comprendre l'impact de la situation de production sur les réponses obtenues.

Concernant le registre phylogénétique, nous évaluerons les connaissances des étudiants sur la classification phylogénétique actuelle et nous analyserons le type d'arguments convoqué.

Nous comparerons les réponses à cette question phylogénétique pour chaque conception, ce qui nous permettra de tester l'hypothèse d'un lien entre le type de classification construit par les étudiants (fonctionnelle ou phylogénétique) et les réponses à la question phylogénétique.

3.3.2. Analyse de la logique de raisonnement face à une espèce problématique, une plante à fleurs non chlorophyllienne (orobanche)

Comme ce fut mentionné précédemment, une plante à fleurs non chlorophyllienne - telle qu'une orobanche - constitue une situation problématique qui permet d'analyser la logique de pensée des étudiants entre problèmes phylogénétique et fonctionnel. Cette espèce n'est pas photosynthétique, elle n'est donc pas végétale selon une conception fonctionnelle. Cependant, d'un point de vue phylogénétique elle reste une plante à fleurs (Angiosperme) malgré la perte secondaire de la chlorophylle et donc de la photosynthèse. Elle est donc végétale dans le cadre d'une conception phylogénétique, telle que la CPR limitée à la lignée verte (Archaeplastida) réduite.

L'analyse des réponses concernant l'appartenance de l'orobanche aux végétaux permettra d'examiner la façon dont elles s'articulent avec leur conception des végétaux inférée sur la base des douze espèces précédentes et de la question ouverte. Nous comparerons avec la réponse à notre dernière question portant sur un problème phylogénétique. Concernant les étudiants fonctionnalistes qui considèrent l'orobanche comme végétale, nous analyserons la nature des arguments mobilisés justifiant la réponse, ce qui nous permettra de préciser le raisonnement mis en jeu.

3.3.3. Étude des nouveaux obstacles mis en jeu

L'étude de l'articulation entre différentes situations de classification est susceptible de nous donner à observer de nouvelles formes de raisonnement dont certaines peuvent constituer, dans certains contextes, des obstacles. L'étude de l'argumentation devrait permettre de caractériser chaque type d'obstacle repéré.

3.4. Synthèse de la méthodologie mise en œuvre

Le tableau 8 résume la méthodologie mise en œuvre pour chaque question de recherche.

QUESTIONS DE RECHERCHE	MÉTHODOLOGIE
QR1 : étude des conceptions des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification, analyse de leurs modes de fonctionnement et de leurs origines possibles	
QR1a : Identification des conceptions des végétaux en tant que groupe biologique dans une situation de classification pour laquelle le registre explicatif n'est pas imposé. Quelles espèces les étudiants classent-ils parmi les végétaux et pour quelles raisons ? Quelles sont les caractéristiques utilisées par les étudiants pour définir le groupe des végétaux ? Quels problèmes fondent leurs classifications ?	L'analyse des questionnaires implique un codage des données (avec une grille de codage définie préalablement et complétée au fur et à mesure du dépouillement) 3 étapes d'analyse : 1. Analyse *a priori* : catégorisation des conceptions envisagées grâce à une étude préalable (épistémologique et didactique) 2. Analyse supervisée avec le logiciel R : identification et dénombrement des étudiants pour chaque conception 3. Analyse non supervisée : examen en retour de la validité des conceptions *a priori* et recherche d'éventuelles catégories émergentes non anticipées. Utilisation de deux méthodes statistiques complémentaires : classification hiérarchique (h-clust) et analyse des correspondances multiples (ACM) Étude qualitative du raisonnement des étudiants des différents groupes identifiés (nature des arguments pour les différentes questions)
QR1b : Sont-ils capables d'expliciter spontanément la tension relative à la polysémie du concept de végétal, entre pensées fonctionnaliste et phylogénétique ?	Analyse de l'argumentation dans les différentes questions à la recherche d'une explicitation de la tension relative au concept de végétal
QR1c : Confrontés à des Eucaryotes unicellulaires qui ont posé problème au cours de l'histoire de la classification, comment les étudiants réagissent-ils pour classer ces espèces vis à vis des végétaux ? Rencontrent-ils des difficultés particulières pour ces espèces ?	1. Étude de l'occurrence de réponses « Ne sait pas » (NSP) pour les Eucaryotes unicellulaires *Euglena*, *Surirella* (diatomée) 2. L'argumentation concernant ces micro-organismes mobilise-t-elle des arguments d'emboîtement (inclusion ou exclusion par rapport au groupe des végétaux) dans des proportions différentes de celles relatives aux macro-organismes ?

QR1d : Les réponses des étudiants font-elles recours à des modes de raisonnement susceptibles d'exercer la fonction d'obstacle dans certaines situations ?	Étude quantitative de l'occurrence de certaines formes de raisonnement pouvant faire obstacle et analyse des arguments pour chaque type d'obstacle repéré.
QR2 : étude des logiques de réponses en fonction des situations et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique	
QR2a : Quelles sont les relations entre les réponses des étudiants et les différentes situations de classification : - question ouverte, mais avec des espèces variées qui présentent des caractéristiques différentes, susceptibles d'entraîner des changements de réponses - puis question résolument fonctionnelle à l'échelle écosystémique (problème écologique) - et enfin une question engageant un problème phylogénétique ? Autrement dit, comment évolue la logique de leurs réponses en fonction des situations ?	Étude des réponses aux questions 3 (écologique) et 4 (phylogénétique). Comparaison avec les réponses aux deux premières questions (classification au registre explicatif non imposé). Identification des limites de validité des conceptions identifiées lors de la première phase de la recherche en caractérisant les éventuels changements de logique de réponses selon les trois situations de classification
QR2b : comment les étudiants gèrent-ils la dualité des logiques des classifications fonctionnelle et phylogénétique au regard d'une espèce problématique, une plante à fleurs parasite non chlorophyllienne (orobanche) ?	1. Analyse de la relation entre la réponse concernant l'appartenance d'une plante non chlorophyllienne aux végétaux et la conception des végétaux inférée dans la situation ouverte puis la réponse à la question 4 (phylogénétique) 2. Analyse de l'argumentation relative à une orobanche pour accéder au raisonnement mis en œuvre, en étudiant particulièrement les étudiants mobilisant une conception fonctionnelle des végétaux, basée sur la photosynthèse
QR2c : L'articulation de différents types de classification révèle-t-elle la mobilisation d'autres obstacles que ceux identifiés précédemment ?	Étude de l'argumentation pour chaque type d'obstacle repéré.

Tableau 8 : synthèse de la méthodologie pour chaque question de recherche

4. Résultats et discussion

La présentation des résultats et leur discussion sont découpées en deux parties successives qui correspondent à nos deux familles de questions de recherche.

4.1. Résultats concernant les conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification (QR1)

4.1.1. Résultats de l'analyse supervisée : une représentation très inégale des différentes conceptions

Le tableau 9 présente les résultats de l'analyse supervisée. Il indique pour chaque conception le nombre d'étudiants identifiés avec notre protocole, ainsi que le pourcentage de l'effectif total de 333 étudiants.

	Indécis	**Conception par opposition**		**Conception fonctionnelle**		**Conception fonctionnelle et cellulaire**		**Conception fonctionnelle macrocentrée**			**Conception phylogénétique réduite**		**Autre**
	NSP ≧2	**CPOs**	**CPO**	**CFs**	**CF**	**CFCs**	**CFC**	**CFMs**	**CFM1**	**CFM2**	**CPRs**	**CPR**	**Autre**
N	38	1	10	13	14	66	55	14	8	9	5	3	97
N	38	11		27		121		31			8		97
%	11,4 %	3,3 %		8,1 %		36,3 %		9,3 %			2,4 %		29,1 %

Tableau 9 : résultats de l'analyse supervisée pour chaque conception stricte (s) et élargie. N : nombre d'étudiants par catégorie. % : pourcentage de l'effectif total (333)

Les résultats sont représentés de façon graphique en figure 18.

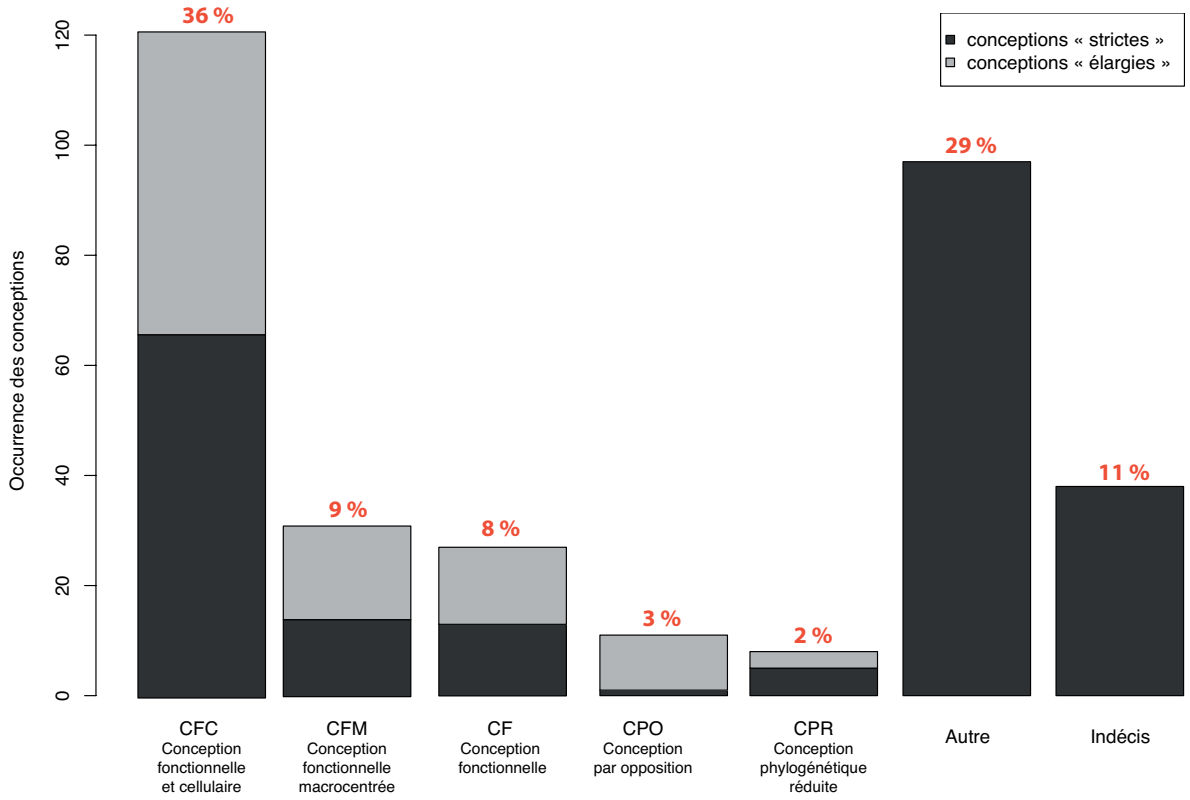


Figure 18 : graphique présentant l'occurrence de chaque conception identifiée par l'analyse supervisée

38 étudiants donnent au moins deux réponses « ne sais pas (NSP) pour les douze premières espèces de la question 2 : ils représentent 11 % de l'échantillon total (333 réponses). Nous les nommons « indécis ». Ils sont écartés de la suite de l'analyse supervisée et menée sur les 295 étudiants ayant au maximum une réponse NSP sur les douze premières espèces. Nous nous attachons à l'identification des conceptions qui présentent un domaine de validité suffisamment large concernant les douze espèces proposées et, pour cela, nous préférons écarter les étudiants qui répondent NSP trop souvent. Cependant, nous serons amenés à étudier de près les réponses de ces 38 étudiants nommés « indécis » pour examiner si, paradoxalement, ils répondent NSP en raison d'un recul important sur le sujet, considérant qu'il existe plusieurs façons de définir les végétaux et donc de répondre aux questions posées (cf. p. 128).

Les cinq conceptions sont représentées dans des proportions très différentes :

- La conception fonctionnelle et cellulaire CFC domine largement. Elle reste la plus fréquente avec 121 étudiants, soit 36 % de l'échantillon total.
- Ensuite, avec presque 10 % de l'effectif total, arrivent les conceptions fonctionnelle macrocentrée CFM : 31, soit 9 % et fonctionnelle CF : 27, soit 8 %.

- Enfin, figurent les conceptions « par opposition » CPO et phylogénétique réduite CPR, avec seulement 6 étudiants : 3% et 4 étudiants : 2%.

Avec 179 étudiants, les trois conceptions fonctionnelles (CF, CFC et CFM) qui font un recours explicite à la photosynthèse sont majoritaires.

En dernier lieu, 97 étudiants : 29 % n'entrent dans aucune des cinq conceptions définies *a priori* et sont alors catégorisés comme « Autre ». Ce résultat élevé sera à examiner attentivement à l'occasion de l'analyse supervisée ce qui permettra de comprendre la nature de ce groupement « par défaut ».

Le tableau 10 présente des exemples de réponses d'étudiant pour chaque conception, des exemples que nous jugeons représentatifs. Ce tableau révèle que les différentes conceptions envisagées, suite à l'analyse *a priori,* se retrouvent dans notre jeu de données.

Conception par opposition CPO	Étudiant 160 : Q1 : « Être vivant qui ne peut se déplacer. Fait de la matière organique à partir de minérale »; Q2 Amanita : Végétal car « Pour moi les champignons (donc Basidiomycètes) sont des végétaux. De plus, l'organisme présente une paroi. »; Q4 : « En gros, tout ce qui n'est pas animal ou minéral est végétal »
Conception fonctionnelle CF	Étudiant 107 : Q1 : « Les végétaux ont pour définition : "tout organisme réalisant la photosynthèse oxygénique". On observe alors que les champignons ne sont pas à inclure dans cette définition. À l'inverse, certaines bactéries telles que les cyanobactéries doivent y être incluses. »
Conception fonctionnelle et cellulaire CFC	Étudiant 2 : Q1 : « Les végétaux : ensemble des organismes eucaryotes effectuant la photosynthèse oxygénique »
Conception fonctionnelle macrocentrée CFM	* Étudiant 80 (Conception CFM « stricte ») : « Être pluricellulaire, eucaryote, photosynthétique ». Q2 : Ulva : végétal. * Étudiant 118 (Conception CFM2): Q1 "Les végétaux sont des organismes eucaryotes hétérotrophes pluricellulaires qui présentent une structure particulière racine, tige, feuilles. Ces organismes sont capables de réaliser la photosynthèse c'est-à-dire de produire leur propre matière organique à partir de matière minérale, d'eau et de lumière (on parle de producteurs primaires)." Q2 Ulva : Non végétal car « Bien qu'étant chlorophyllien, cet organisme ne présente pas la structure typique des végétaux : racine, tige, feuille. Il n'y a pas de structures spécialisées dans l'absorption et la photosynthèse. On parle de thalle. »
Conception phylogénétique réduite CPR	Étudiant 329 : Q1 : « Les végétaux sont des organismes de la lignée verte (eucaryotes-bicontes). Chloroplastes à 2 membranes dû à l'endosymbiose primaire d'une cyanobactérie avec ou sans conservation des phycobilisomes)"; Q2 Surirella : non végétal car « Pas lignée verte »

Tableau 10 : exemples de réponses pour chaque conception

4.1.2. Résultats de l'analyse non supervisée : confrontation des conceptions définies *a priori* et des catégories émergentes

L'analyse non supervisée a été réalisée sur le tableau disjonctif complet et élaboré à partir de la réponse à la seconde question (concernant les douze premières espèces) pour les 295

étudiants « non indécis ». Nous présenterons successivement les résultats de la classification hiérarchique puis l'analyse des correspondances multiples.

- **Résultats de la classification hiérarchique (h-clust)**

La figure 19 représente l'arbre de similitude (ou dendrogramme) obtenu par classification hiérarchique (méthode d'agrégation de Ward).

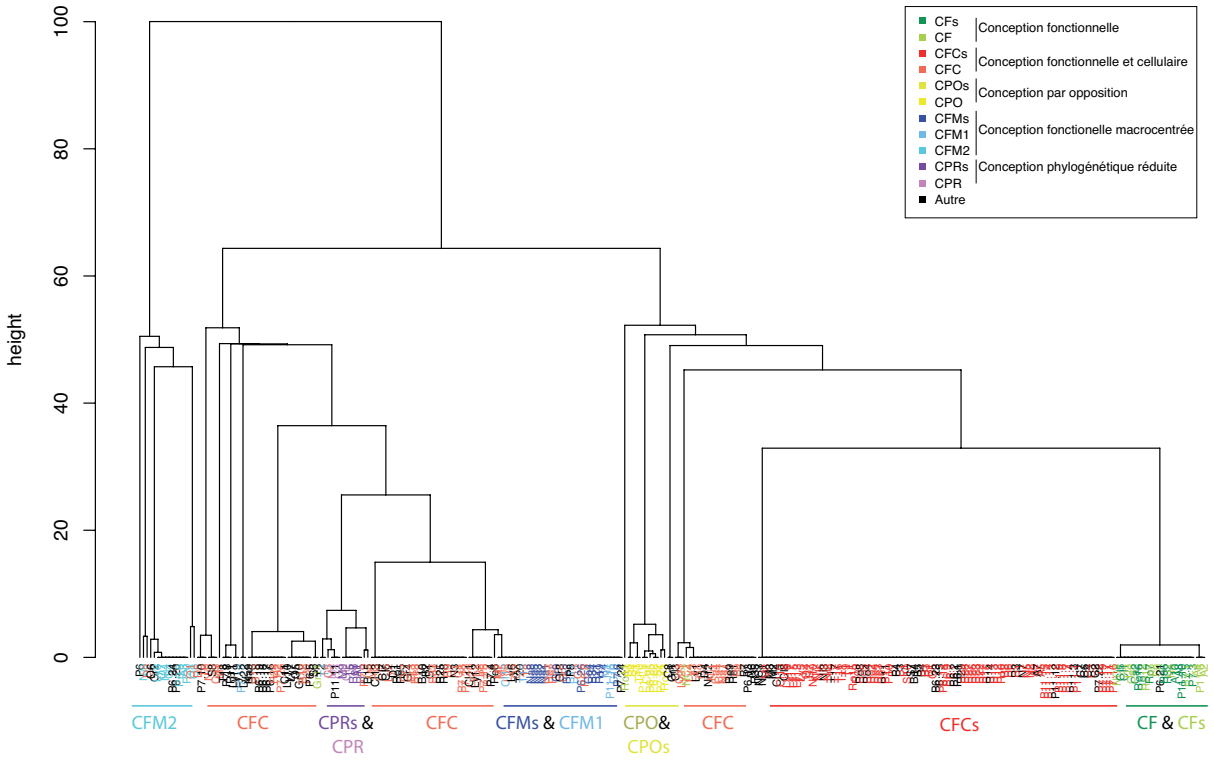


Figure 19 : dendrogramme produit par classification hiérarchique (h-clust) utilisant la méthode d'agrégation de Ward. Échantillon : 295 étudiants non indécis. L'ordonnée (*height*) indique la valeur du critère associé à la méthode d'agrégation utilisée. Les étudiants sont indiqués par leur identifiant[29] et sont colorés selon la conception qui leur a été affectée par l'analyse supervisée.

Les deux méthodes d'agrégation Average et Ward fournissent un résultat similaire quant aux différentes catégories obtenues. Les numéros d'identification désignant les étudiants ont été colorés selon leur conception, inférée par l'analyse supervisée, permettant d'analyser si les différents types de conceptions sont retrouvés par cette méthode statistique.

Certaines conceptions sont bien retrouvées par la classification hiérarchique : les étudiants assignés à cette conception sont regroupés. Il s'agit de la conception par opposition, en jaune, de la conception fonctionnelle, en vert et de la conception phylogénétique réduite, en violet.

[29] Initialement, chaque étudiant était identifié par une lettre, indiquant la ville de leur université puis un numéro. Afin de ne pas reconnaître les universités, nous avons décidé de changer d'identifiant en ne mettant qu'un numéro. Mais l'analyse non supervisée ayant été réalisée avec les premiers identifiants. Nous n'avons cependant pas estimé nécessaire de refaire les figures en changeant les identifiants.

En revanche, la conception fonctionnelle macrocentrée CFM est divisée en deux groupes bien distincts dans l'arbre : les 9 individus CFM2 en bleu clair, à gauche de l'arbre, et les 22 individus CFMs et CFM1 en bleu foncé, regroupés plus au centre de l'arbre. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la conception CFM2 est définie par une centration sur les plantes terrestres (Embryophytes) en excluant les algues des végétaux. Elle se distingue donc des deux autres (CFMs et CFM1) qui incluent les macro-algues. En raison de la différence de réponses concernant trois espèces de macro-algues (*Ulva*, *Fucus*, *Palmaria*), les deux populations d'étudiants se trouvent séparées dans l'arbre. L'étude des réponses des étudiants CFM1$_{\&}$s et CFM2 aux autres questions (orobanche, questions écologique et phylogénétique) permettra d'indiquer s'il est plus pertinent de conserver deux sous-catégories conceptuelles au sein d'une conception macrocentrée ou, au contraire, de distinguer totalement ces deux conceptions.

La conception fonctionnelle et cellulaire (dominante) est également divisée dans l'arbre. Les 66 étudiants de la conception CFC stricte, en rouge foncé, sont bien regroupés à droite de l'arbre et sont proches du groupe fonctionnel, ne s'en distinguant que par une seule espèce *Synechococcus* (cyanobactérie). Par contre, les 55 étudiants de la conception fonctionnelle et cellulaire élargie, en rouge clair, sont dispersés dans différentes branches de la moitié gauche de l'arbre, ce qui signifie qu'il existerait plusieurs types de CFC. Cette méthode d'analyse montre ici sa limite car elle ne permet pas d'expliquer les différents sous-groupes de CFC que nous expliquerons par l'analyse des correspondances multiples.

Les étudiants « Autre », en noir, ne sont pas regroupés dans une branche particulière de l'arbre mais se trouvent dispersés dans toutes les branches, au côté d'étudiants des différentes conceptions définies par l'analyse *a priori*. Ce résultat semble soutenir l'idée qu'il n'y aurait pas une conception supplémentaire non anticipée. Mais il faut être prudent. Ne pas conclure trop rapidement car l'analyse non supervisée ne prend en compte que les réponses à la question 2 (V, NV ou NSP), sans analyser l'argumentation proposée pour justifier la réponse. Cette analyse prend seulement en compte la combinaison d'espèces considérées ou non comme végétales.

- **Résultats de l'analyse des correspondances multiples (ACM)**

En raison du nombre élevé d'étudiants (295) et de variables : 36 au maximum[30], la figure obtenue par l'analyse des correspondances multiples apparaît peu lisible.

[30] Sur les 36 variables, 15 variables sont rencontrées effectivement dans notre jeu de données, car certaines n'apparaissent pas. Par exemple, aucun étudiant n'a répondu NV pour l'Andromède (Angiosperme).

Nous avons donc décidé de décomposer l'ACM par catégorie de conception de manière à faciliter la lecture, soit six graphiques (cf. figure 20).

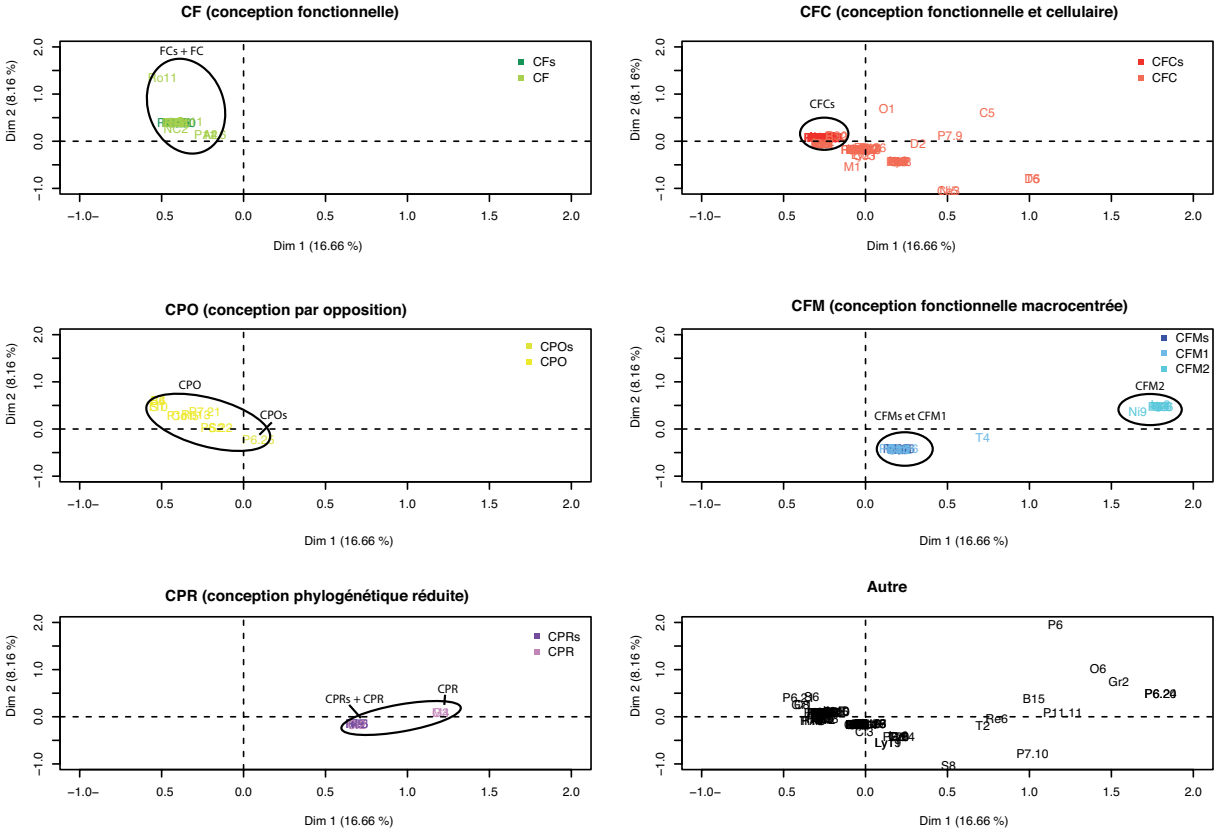


Figure 20 : projection par conception des étudiants sur le premier plan de l'ACM

Les deux dimensions, ou composantes principales, qui expliquent le maximum de diversité décrivent 16,66 %, pour la dimension 1 et 8,16 %, pour la dimension 2, soit en tout 24,8 % de la variabilité des données, ce qui est assez faible.

Nous remarquons que les différentes conceptions permettent l'échantillonnage des espaces spécifiques, particulièrement pour les conceptions CF, CPO, CPR et CFM, divisés en deux sous-espaces pour CFM1&s et CFM2. Les étudiants CFC se répartissent en différents sous-espaces suggérant qu'il peut exister différents types de conception CFC. Ces résultats restent en accord avec ceux de la classification hiérarchique. Afin de mieux comprendre les sous-catégories de la conception fonctionnelle et cellulaire, nous avons réalisé une nouvelle analyse des correspondances multiples (ACM) mais uniquement sur cette population de 121 étudiants. Les résultats de cette nouvelle étude méritent d'être intégrés dans l'analyse de l'argumentation de la section suivante dédiée à la discussion des différentes conceptions.

4.1.3. Discussion relative aux différentes conceptions des végétaux dans une situation ouverte de classification (QR1a)

De façon à éclairer le raisonnement définissant chaque conception, chacune de celle-ci sera discutée successivement dans l'ordre de son importance quantitative, permettant de porter notre attention sur le groupe « Autre » défini par défaut.

- **La conception fonctionnelle et cellulaire (CFC)**

➢ **Une conception sous-tendue par deux problèmes**

La conception fonctionnelle et cellulaire est la plus fréquente avec 121 étudiants, soit 41 % des étudiants non indécis (295) ou 36 % de l'échantillon total (333). Un premier exemple de réponse d'étudiant avait été donné dans le tableau 10 (cf. p. 112). Un second exemple - celui de l'étudiant 1, - montre la combinaison d'un problème fonctionnel (nutritionnel) avec un problème structural à l'échelle cellulaire.

> « Les végétaux sont des organismes qui forment un groupe non monophylétique, ils partagent cependant un ensemble de caractères communs :
>
> - ils font la photosynthèse oxygénique (ils sont photolithotrophes) + métabolisme secondaire riche
>
> - ils possèdent des caractères cellulaires particuliers (chloroplastes, vacuole, paroi)
>
> - ils présentent pour beaucoup une immobilité.
>
> Ils regroupent la "lignée verte", mais aussi les Euglénophytes, Cryptophytes, Haptophytes, Chlorarachniophytes et un autre groupe qui m'échappe. »

D'autres étudiants envisagent la possibilité que la chlorophylle et donc la photosynthèse peut être parfois absente, en signalant « la plupart des végétaux ». L'étude des réponses concernant l'orobanche et la monophylie des végétaux (Q4) devrait éclairer ce que ces étudiants entendent par la possibilité de cette absence. Voici l'exemple de la définition des végétaux proposée par l'étudiant 43 :

> « Ce sont des êtres vivants unicellulaire ou pluricellulaire. Les organites cellulaires qui leur sont spécifiques sont la vacuole, le chloroplaste et une paroi pecto-cellulosique. **La plupart des** végétaux possèdent des pigments photosynthétiques tels que la chlorophylle et sont photo-autotrophes », *c'est nous qui soulignons.*

Il est à noter que des étudiants ont spontanément[31] schématisé une cellule végétale pour définir les végétaux dans la question 1 (cf. tableau 11), attestant de leur grand attachement à des critères cellulaires pour définir les végétaux.

[31] Cette schématisation spontanée montre l'avantage que présente le format « papier-crayon » du questionnaire par rapport à une enquête en ligne.

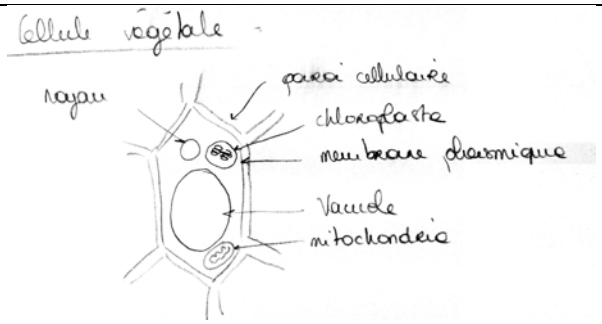
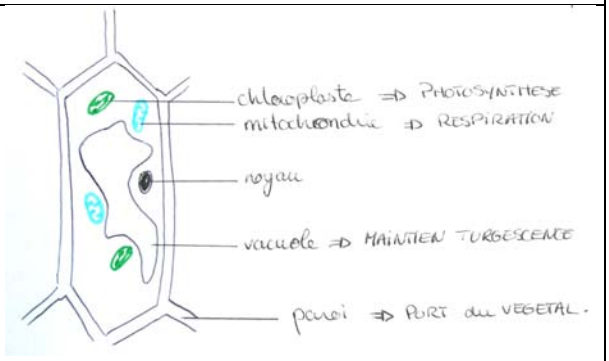
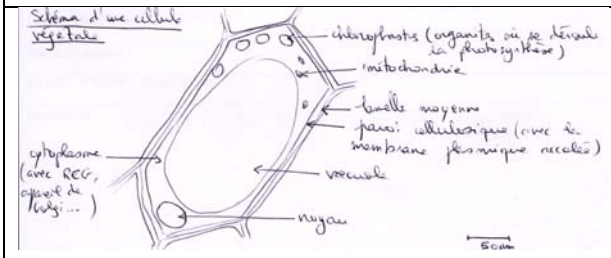
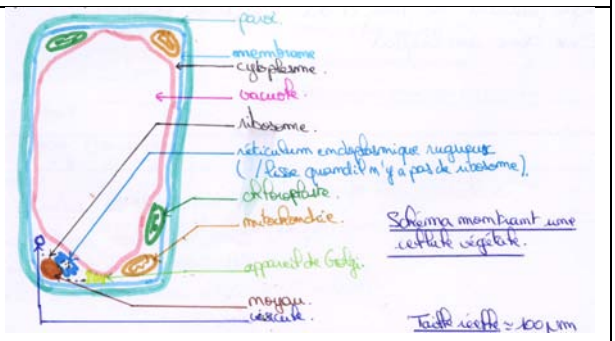
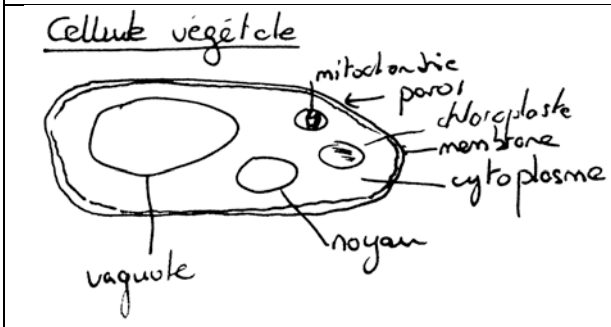
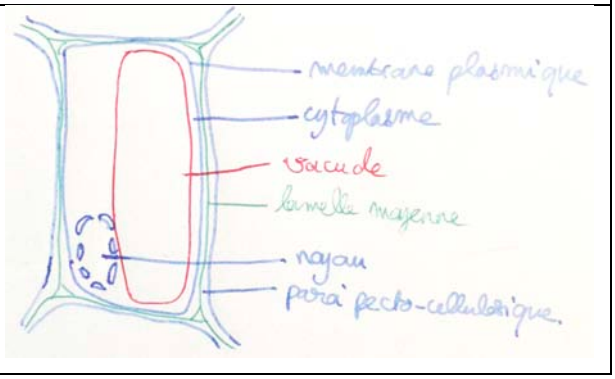
Étudiant 42	Étudiant 172
	
Étudiant 188	**Étudiant 203**
	
Étudiant 287	**Étudiant 229**
	

Tableau 11 : exemples montrant l'attachement à « la » cellule végétale

- **Les différentes catégories conceptuelles au sein de la CFC**

Afin d'expliquer les sous-groupes de la conception fonctionnelle et cellulaire, une autre ACM a été réalisée spécifiquement pour les 121 étudiants exprimant cette conception (cf. figure 21). Sur un même plan sont représentés les étudiants et les variables expliquant la variabilité représentée dans ce plan.

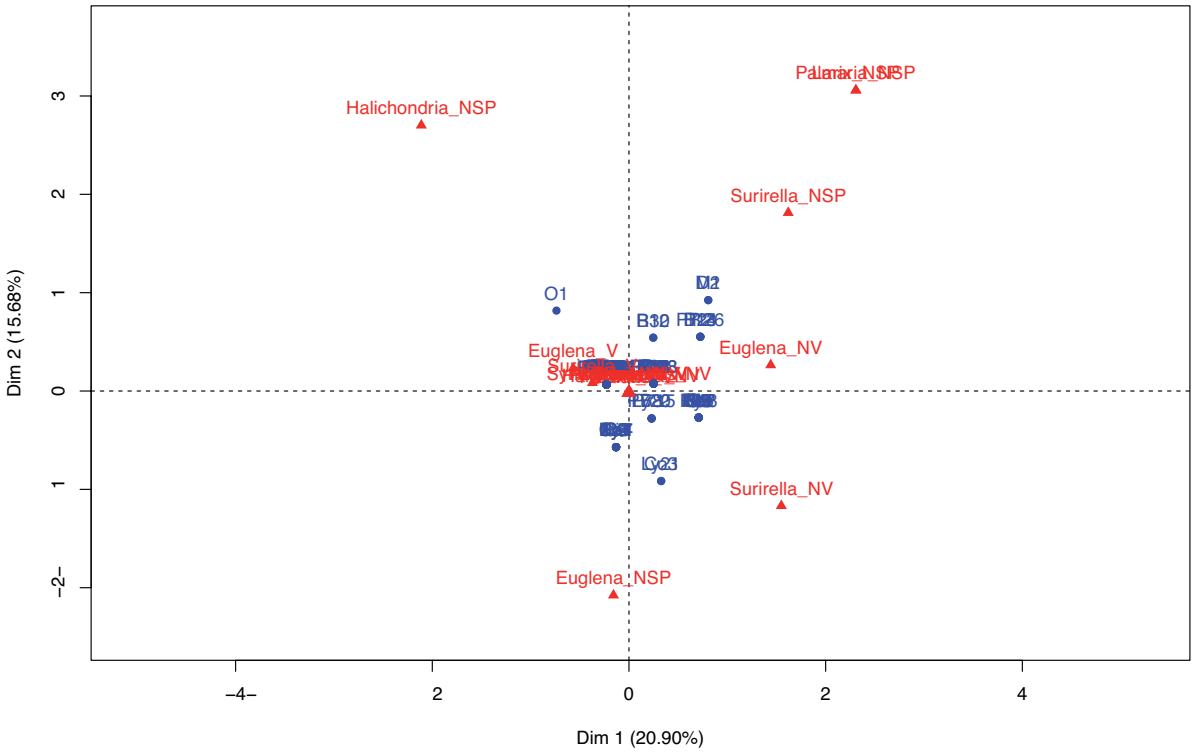


Figure 21 : analyse des correspondances multiples (ACM) réalisée sur les étudiants CFC. En bleu : les étudiants ; en rouge : les variables expliquant la variabilité représentée. Les deux dimensions de ce plan expriment 36,6 % de la variabilité du jeu de données.

De nombreux étudiants se superposent, en raison d'un profil de réponse similaire pour les douze espèces. Nous allons conduire l'analyse en deux temps : tout d'abord examiner les étudiants, moins nombreux, qui se distinguent le plus des autres, c'est-à-dire situés à distance du centre du graphique, ensuite réaliser un nouveau graphique plus lisible afin de porter notre attention sur les étudiants plus nombreux et plus proches du centre du graphique.

Les deux sous-groupes d'étudiants, situés le plus bas du graphique, sont expliqués par la variable Euglena_NSP. Il s'agit de ceux qui ne se prononcent pas sur l'appartenance de l'euglène aux végétaux. Plus en haut, c'est la variable Surirella_NSP qui explique certains groupes. Dans ce cas, les apprenants ne se prononcent pas pour la diatomée.

L'étudiant O1 se trouve isolé en haut à gauche et sa position est expliquée par la variable Halichondria_NSP. Deux étudiants, en haut à droite, sont expliqués par la variable Palmaria_NSP. Il s'agit de l'étudiant D2 et Larix_NSP pour l'étudiant M1[32]. Le quart-en bas à droite de l'ACM est expliqué par Surirella_NV. Les étudiants situés à droite, près de la ligne des abscisses (dimension 1), sont expliqués par la variable Euglena_NV.

[32] Sachant que l'étudiant M1 n'a en fait coché aucune case pour *Larix*, ce que nous avons codé par défaut NSP.

La superposition des étudiants en groupe rend le graphique précédent peu lisible. Il est impossible d'identifier les étudiants concernés, notamment pour consulter le profil de leurs réponses concernant les douze espèces. Après avoir éliminé du tableau disjonctif les étudiants très éloignés pour mieux séparer les étudiants au centre et rechercher une explication pour chacun des groupes, nous décidons de réaliser une autre ACM.

Pour plus de lisibilité des identifiants d'étudiants, l'ensemble des variables n'est pas représenté. Les variables explicatives les plus importantes sont ajoutées manuellement et dans un second temps sur le graphique. Pour permettre de lire les identifiants, nous séparons, toujours manuellement, les étudiants superposés sur le graphique grâce à un logiciel de dessin vectoriel (Adobe Illustrator). Nous les entourons pour indiquer qu'ils sont superposés sur l'ACM.

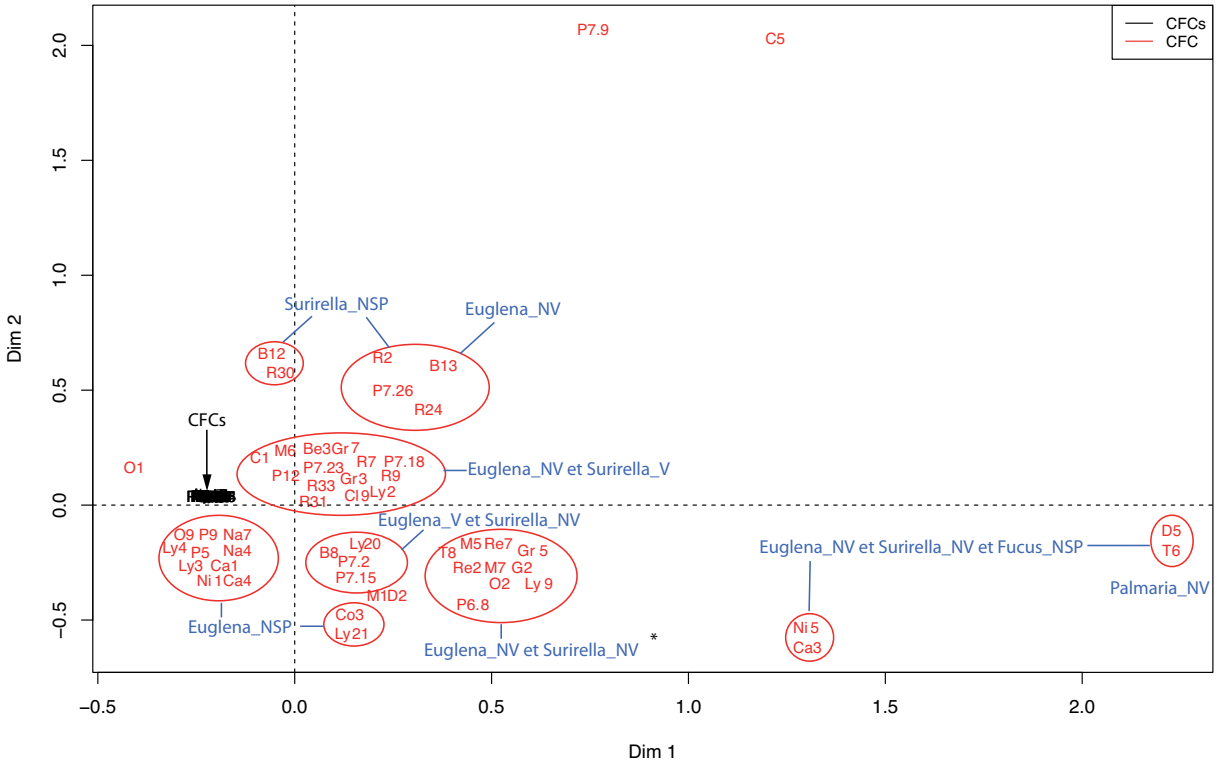


Figure 22 : analyse des correspondances multiples (ACM) réalisée sur les étudiants CFC. Chaque groupe d'étudiants entourés apparaissaient confondus et ont été séparés manuellement sur le graphique pour pouvoir lire les identifiants des étudiants. Les variables explicatives ont été ajoutées manuellement sur ce graphique.

Le quart du graphique, situé en bas à droite de l'ACM, est expliqué par la variable Surirella_NV. Il s'agit de 20 étudiants CFC considérant la diatomée comme non végétale. La partie droite du graphique se trouve expliquée par la variable Euglena_NV. Il s'agit de 31 étudiants CFC pensant que l'euglène n'est pas végétale.

Il apparaît un groupe, repéré par une étoile (*), constitué de 9 étudiants CFC excluant les deux micro-organismes eucaryotiques (*Euglena* et *Surirella*). Ce profil de réponse devrait conduire à leur assigner la conception fonctionnelle macrocentrée ($CFMs_{\&}1$). En cherchant les identifiants de ces étudiants dans le dendrogramme (h-clust), nous les trouvons regroupés avec ceux de leurs pairs qui ont une conception fonctionnelle macrocentrée ($CFMs_{\&}1$). Après vérification de leur argumentation, ils n'entrent pas dans la conception CFM1 car ils ne mobilisent pas le critère de pluricellularité en question 1 et ils n'excluent pas *Euglena* et *Surirella* en raison de leur unicellularité. Rappelons que ces deux conditions avaient été ajouté dans le script de manière à contraindre davantage l'inférence de la conception CFM1.

Pour quelles raisons excluent-ils l'euglène des végétaux ? 8 étudiants sur les 9 concernés avancent l'argument de l'absence d'une paroi cellulaire. Deux de ces huit étudiants ajoutent que l'euglène se déplace activement. L'un d'eux (Ly9 ou 293) précise que l'euglène appartient au règne animal pour cette raison. Le neuvième étudiant exclut l'euglène des végétaux pour la seule raison d'immobilité. Celui-ci définit les végétaux en question 1 en mettant en avant la conception fonctionnelle et cellulaire, tout en ajoutant un critère morpho-anatomique (thalle ou cormus) :

> « Les végétaux sont des organismes eucaryotes dont la plupart sont photosynthétiques, ce qui est à mettre en relation avec leur couleur verte (uniquement les organes chlorophylliens).
>
> Les végétaux peuvent être formés **d'un thalle ou d'un cormus (tige, feuilles, racines)**. », *c'est nous qui soulignons.*

Concernant la diatomée *Surirella*, l'euglène est exclue des végétaux par ces neuf étudiants pour les raisons suivantes :

- mobilité active : 5 étudiants sur 9,
- appartenance au règne animal : 1 sur 9, ou aux protozoaires : 1 sur 9,
- nature siliceuse de la paroi : 2 sur 9,
- absence de vacuole : 1 sur 9,
- absence de plastes à deux membranes mais présence de plastes à quatre membranes : 1 sur 9,
- absence de justification : 1 sur 9.

L'étude de la justification de l'exclusion de ces deux espèces du groupe des végétaux nous permet de dire que ces neuf étudiants ne mobilisent pas une conception macro-centrée, mais une conception fonctionnelle et cellulaire à laquelle s'ajoutent certaines conditions comme l'immobilité et/ou certaines caractéristiques cellulaires spécifiques : la présence d'une paroi étant le critère dominant. L'analyse des réponses de ces neuf étudiants montre l'importance de

ne pas restreindre notre inférence des conceptions à la seule combinaison des espèces regroupées au sein des végétaux, ainsi que d'assurer une prise en compte de la nature des arguments avancés.

Les différentes catégories de la conception fonctionnelle et cellulaire sont liées à l'attachement à certaines caractéristiques définitoires. Par exemple, des étudiants précisent la définition cellulaire des végétaux selon certains caractères, comme la présence d'une paroi, voire même sa nature biochimique pecto-cellulosique.

Quelle pourrait-être l'origine de cette conception dominante ?

- **Origine supposée de cette conception**

L'importance quantitative de la conception fonctionnelle et cellulaire pourrait résulter - du moins partiellement - des enseignements universitaires. En effet, « la » cellule végétale reste classiquement enseignée en comparaison de « la » cellule animale. L'exemple prototypique, constaté dans l'enseignement et les manuels, est celui d'une cellule d'Angiosperme - le plus souvent du parenchyme chlorophyllien - mais pas une cellule comme une euglène ou une diatomée. Nous pouvons également signaler l'influence potentielle des ouvrages universitaires de biologie végétale qui, en nombre, utilisent la conception fonctionnelle et cellulaire des végétaux.

Cette conception prototypique de la cellule végétale pourrait constituer un obstacle didactique pour penser la diversité des végétaux à l'échelle cellulaire (Clément, 2007). En effet, les caractères cellulaires des Angiospermes ne sont pas partagés par l'ensemble des organismes photosynthétiques. La conception prototypique cellulaire peut poser le problème de la généralisation implicite des caractères cellulaires angiospermiens à l'ensemble des végétaux (au sens fonctionnel). Cette vision prototypique cellulaire renvoie à une pensée typologique. Selon la dualité aide-obstacle bachelardienne, cette conception pourrait constituer une aide pour penser les problèmes de fonctionnement cellulaire et d'endosymbiose, mais à la fois un obstacle pour penser la diversité du vivant à l'échelle cellulaire.

D'un point de vue quantitatif, la seconde conception est la CFM. Attachons-nous à mieux comprendre le mode de fonctionnement de cette conception, ses sous-groupes : CFM1 et 2, et leurs origines possibles.

- **La (ou les) conception(s) fonctionnelle(s) macrocentrée(s) (CFM)**

➢ **Deux conceptions fonctionnelles macrocentrées**

La conception fonctionnelle macrocentrée combine un critère fonctionnel : la photosynthèse, et un critère structural : une organisation pluricellulaire, conduisant à l'exclusion des Eucaryotes unicellulaires. Elle se divise en deux catégories : la première : CFMs$_{\&}$1 inclut les macro-algues, alors que la seconde est restreinte aux seules plantes terrestres ou Embryophytes : CFM2. La CFMs$_{\&}$1 reste deux fois plus importante que la CFM2 : 22 étudiants contre 9. L'étude de l'argumentation des neuf étudiants CFM2 révèle deux cas de figure. Le premier met en avant des arguments structuraux, comme la présence d'une tige feuillée. Le second cas est moins fréquent : seulement deux étudiants ajoutent des arguments fonctionnels, comme l'indiquent les citations ci-dessous :.

> Étudiant 91 : Question 1 : « Organisme photosynthétique chlorophyllien fixé à un substrat et **l'utilisant pour se nourrir ».** Question 2 *Ulva* : Non végétal car « Les algues n'utilisent pas leur substrat **pour se nourrir** », *c'est nous qui soulignons.*
>
> Étudiant 118 : « Bien qu'étant chlorophyllien, cet organisme ne présente pas la structure typique des végétaux : racine, tige, feuille. Il n'y a pas de **structures spécialisées dans l'absorption et la photosynthèse**. On parle de thalle », *c'est nous qui soulignons.*

La pensée macrocentriste est-elle mobilisée différemment entre la question 1 de définition des végétaux et la seconde question ?

➢ **Évolution du macrocentrisme**

À la première question ouverte, certaines réponses se centrent sur les seules plantes à fleurs : Angiospermes. Le macrocentrisme se trouve poussé à son extrême. À titre d'exemple, citons la définition des végétaux proposée par deux étudiants en question 1 et un schéma réalisé spontanément.

> Étudiant 111 : « Organismes eucaryotes fixés à un substrat, ayant un métabolisme autotrophe. Ils comportent une partie souterraine formée par les racines et une partie aérienne formée des tiges, feuilles et **fleurs**. », *c'est nous qui soulignons.*
>
> Étudiant 142 : « Organisme eucaryote pluricellulaire, autotrophe capable de réaliser la photosynthèse, de se reproduire par reproduction sexuée ou asexuée. Ils présentent des structures végétatives (feuille, tige, racine) **et des structures reproductrices (pistil, étamine, pollen, fleurs)** », *c'est nous qui soulignons.*

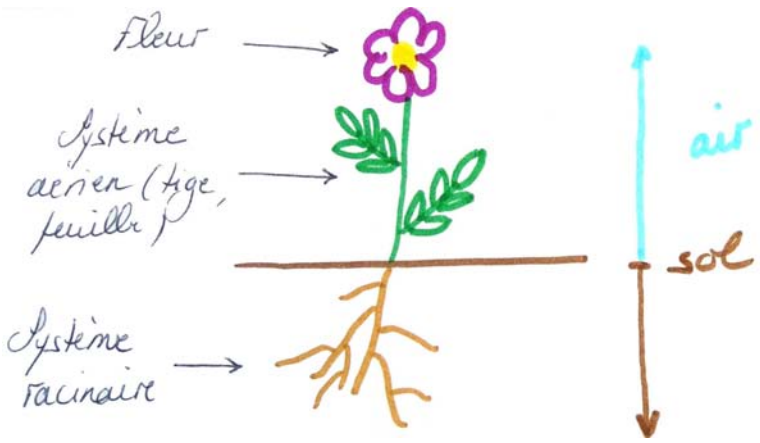


Figure 23 : schéma proposé par l'étudiant 179 en réponse à la question 1

Pourtant, aucune réponse à la seconde question ne correspond à cette conception réduite aux seules plantes à fleurs. L'approche la plus macrocentrée rencontrée à la question 2 (notée CFM2) comprend l'ensemble des plantes terrestres : Embryophytes. Partant spontanément d'une approche très réductrice, les étudiants ont ensuite répondu de façon plus large et toujours macrocentrée. Ce résultat nous semble bien montrer toute l'importance de la prise en compte de la situation de production dans l'inférence des conceptions. Chaque situation, pour nous la question posée, détermine la nature du problème soumis aux étudiants. Sur le plan méthodologique, il nous apparaît essentiel d'effectuer un croisement des réponses aux différentes questions pour inférer la conception des étudiants, par nature située, et de ne pas se limiter à une seule question définitoire.

L'analyse de la quatrième question permettra de savoir si un problème phylogénétique est également mobilisé dans la conception macrocentrée CFM2, sachant que les Embryophytes sont monophylétiques dans les phylogénies actuelles.

Enfin, nous pouvons noter la similitude existant entre la CFMs$_{\&}$1 et le règne végétal défini par R. H. Whittaker en 1969. L'analyse historique du chapitre 3 contribuera à comprendre les fondements du règne végétal de Whittaker.

Sur le plan quantitatif, la troisième conception est la conception fonctionnelle. Présentons la de façon approfondie.

- **La conception fonctionnelle (CF)**

27 étudiants définissent les végétaux en mettant en avant leur mode de nutrition photosynthétique et en y incluant la cyanobactérie en question 2 parmi les végétaux.

> Étudiant 5 : « Les végétaux sont des organismes vivants, autotrophes vis à vis du carbone et effectuant la photosynthèse oxygénique grâce à des structures spécialisées dont la chlorophylle est un élément clé. » Q2 *Synechococcus* : V car photosynthétique et possède de la chlorophylle.
>
> Étudiant 48 : « Les végétaux sont un groupe d'êtres vivants dont la caractéristique commune est d'effectuer la photosynthèse. On y regroupe les plantes dites "supérieures" (Angiospermes…) et "inférieures" (mousses…) mais aussi les algues et d'autres unicellulaires (Chlamydomonas...). Le végétal est un concept fonctionnel et non un groupe monophylétique (les végétaux ne sont pas des champignons). » Q2 *Synechococcus* : V car photosynthétique.

Contrairement à la CFM1, la conception fonctionnelle : CF ne présente aucune similarité historique avec une acception passée du règne végétal. Nous le montrerons au chapitre 3, à l'occasion de notre étude historique des classifications. La prévalence de cette conception pourrait s'expliquer par les problèmes écologiques qu'elle permet de traiter. Elle donne la possibilité d'établir un regroupement selon un unique caractère fonctionnel : la photosynthèse oxygénique, faisant des végétaux des producteurs primaires à la base des réseaux trophiques.
Dès à présent, abordons la conception par opposition.

- **La conception par opposition (CPO)**

Avec seulement 11 étudiants, la conception par opposition représente 3,3 % de l'ensemble des étudiants interrogés. La faible importance de cette conception doit probablement être mise en relation avec le fait que la séparation des champignons des végétaux remonte, de nos jours, à plus de 45 ans.
Regrouper les champignons au sein des végétaux revient à établir une opposition catégorielle avec les animaux. Ce mode de raisonnement n'est pas sans rappeler la vision binaire du monde vivant consacrée par Linné, au XVIII^{e} siècle. Doit-on pour autant considérer que ces onze étudiants mobilisent une conception linnéenne des végétaux ? Pour le savoir, il faut examiner l'argumentation avancée par ceux-ci concernant l'inclusion du champignon *Amanita* parmi les végétaux ?
Trois cas de figure se présentent :

- Présence d'une paroi : 6 étudiants sur 11 (et de façon corrélée, ces étudiants excluent la souris des végétaux car ils ne possèdent pas de paroi),
- Pas de justification : 4 étudiants sur 11,
- Relation symbiotique avec les végétaux : 1 étudiant sur 11. « C'est un organisme symbiotique. Il prélève donc l'énergie de la photosynthèse du végétal avec lequel il est en symbiose » (étudiant 163).

L'argument mis en avant de façon majoritaire (plus de la moitié des étudiants CPO) reste la présence d'une paroi, critère de regroupement au sein des végétaux et de distinction avec les animaux. Les deux exemples suivants illustrent l'attachement à la présence d'une paroi.

> Étudiant 21 : Question 1 : « Les végétaux sont un groupe polyphylétique. Ils regroupent des individus de la lignée verte mais aussi des champignons par exemple. Ils sont constitués d'une **paroi cellulaire**. » Question 2 *Amanita* : Végétal car possède une **paroi**, *c'est nous qui soulignons.*
>
> Étudiant 134 : Question 1 : « Les végétaux sont composés de cellules végétales qui comprennent une membrane plasmique et **une paroi**. La plupart contiennent des chloroplastes et sont capables de faire la photosynthèse (à partir d'eau, d'énergie lumineuse, de CO_2 et de sels minéraux). Ils ont une vacuole. Les champignons ne font pas de photosynthèse » Question 2 *Amanita* : Végétal car **eucaryote avec une paroi**, *c'est nous qui soulignons.*

Cinq étudiants sur onze incluent dans leur définition en question 1 le critère d'immobilité. Ce dernier n'est jamais repris dans le cas spécifique du champignon *Amanita* pour justifier sa nature végétale.

Nous pouvons conclure que cette conception par opposition n'est pas linnéenne puisque la classification élaborée par Carl von Linné, en 1735, ne s'établissait pas sur des fondements de structure cellulaire. Nous le montrerons au prochain chapitre, lors de l'étude historique.

Pour finir la discussion relative aux cinq grandes conceptions, abordons la conception phylogénétique réduite, conception qui est la moins représentée dans notre jeu de données.

- **La conception phylogénétique réduite (CPR) à la lignée verte (Archaeplastida)**

Cette conception qui réduit les végétaux à un groupe phylogénétique, valide dans la classification actuelle la lignée verte. Elle reste cependant minoritaire avec seulement 8 étudiants, soit 2,4 % des étudiants interrogés. Les citations suivantes présentent un exemple représentatif de cette catégorie conceptuelle, mue par un problème phylogénétique.

> Étudiant 86 : Question 1 : « Les végétaux sont des organismes eucaryotes photosynthétiques **(plastes à deux membranes)**. » Question 2 *Palmaria* : végétal car « **Il possède un plaste à 2 membranes, il appartient à la lignée verte (les "végétaux")** ». Question 2 *Fucus* : non végétal car « **Plastes à 4 membranes et non à deux membranes** »*, c'est nous qui soulignons.*

Dès maintenant, nous entendons discuter de la nature du regroupement par défaut « Autre ».

- **La catégorie par défaut « Autre »**

Avec 97 étudiants (soit 29 %), la catégorie « Autre » regroupe tous les étudiants non identifiés par notre protocole d'analyse supervisée. Trois cas de figure semblent pouvoir expliquer

qu'un étudiant ne soit pas catégorisé parmi les cinq conceptions précédentes. Nous allons les discuter l'une après l'autre.

- **Conception supplémentaire non envisagée par l'analyse *a priori***

L'analyse non supervisée indique qu'aucun groupe est constitué uniquement d'étudiants « Autre », colorés en noir dans la classification hiérarchique et l'ACM (cf. p. 113 et p. 115). Ces étudiants se trouvent disséminés dans différentes branches de l'arbre ou différents sous-espaces du plan de l'ACM, à proximité d'étudiants mobilisant l'une des cinq conceptions. La méthodologie mise en œuvre ne nous permet pas d'identifier de nouvelles conceptions.

- **Biais méthodologique lié à notre protocole d'inférence des conceptions**

Notre protocole d'identification des conceptions élargies reste basé sur certaines espèces clés et la formulation d'arguments qui rend explicite la mobilisation d'une conception. Certains étudiants se retrouvent dans la catégorie « Autre » parce qu'ils n'ont pas formulé explicitement un argument crucial dans la définition des végétaux. Pourtant, cet argument a pu être avancé, mais seulement en question 2. L'exemple suivant semble illustrer ce cas de figure.

> Étudiant 24 : assigné comme « Autre » alors qu'en analysant ses réponses, il mobilise la conception CFM1. Q1 : « végétaux : organismes multicellulaires chlorophylliens ». Mais, comme il ne cite pas Eucaryote ou plaste en Q1, il n'est pas identifié par notre script comme mobilisant une conception macrocentrée.

Avec le souci évident de ne pas identifier, à tort, un étudiant qui n'aurait pas mobilisé une conception donnée, notre protocole est donc relativement contraignant. L'étude de l'ACM, réalisée sur les étudiants CFC, avait montré que sans l'exigence de critères explicites de définition, neuf étudiants auraient été, par erreur, assignés à la conception CFM1, par le fait qu'ils excluaient l'euglène et la diatomée mais pas en raison de leur unicellularité (cf. p. 119). Le revers de ce choix méthodologique fait que notre protocole présente un biais conduisant à augmenter l'effectif de la catégorie « Autre ». Il nous semble que la seule façon de procéder serait d'étudier, une à une, la logique des réponses de chacun des 97 étudiants « Autre », de manière à reconnaître les étudiants - comme celui cité précédemment - que notre protocole a manqué. Bien que fastidieux, ce complément d'analyse permettrait de préciser les chiffres avancés pour chacune des conceptions et de s'assurer de leur exactitude.

- **Étudiants présentant une conception possédant un domaine de validité réduit et adaptant leur logique de réponse à chaque situation nouvelle lors de la question 2**

Le dernier cas de figure qui permet d'expliquer l'assignation d'étudiants à la catégorie « Autre » correspond à tous ceux ayant recours à une conception des végétaux qui possèdent un domaine de validité réduit. Ces étudiants changent de logique argumentative lorsqu'ils rencontrent une nouvelle situation qui pose un problème non envisagé initialement. Ainsi, l'étude de la première question, combinée aux douze premières espèces de la seconde question, ne montre pas de cohérence globale. Présentons un exemple permettant d'illustrer ce cas de figure.

> Étudiant 133 : en question 1, il définit les végétaux en mobilisant la CFC explicitant le caractère eucaryote des végétaux qui, de plus, possèdent des plastes : « Les végétaux sont des êtres vivants qui possèdent des caractéristiques cellulaires, moléculaires mais aussi physiologiques, spécifiques de leur groupe. Les principales caractéristiques cellulaires sont la présence de **noyau**, de membrane, mais surtout de paroi, de vacuole et de **chloroplastes**. [*schéma de cellule végétale*] On note qu'il existe des végétaux unicellulaires : les algues unicellulaires qui ne possèdent donc pas de paroi *», c'est nous qui soulignons.* Q2 : Synechococcus : végétale car « algue unicellulaire photosynthétique ». La cyanobactérie est considérée malgré son caractère bactérien. Ici l'absence de noyau et de plaste n'est pas soulignée comme problématique, passant alors à une conception fonctionnelle (CF). Ce changement de logique entraîne sa caractérisation dans « Autre ». Plusieurs hypothèses sont possibles pour interpréter ce changement de logique. Le fait d'avoir nommé historiquement les cyanobactéries « algues bleues » a-t-il joué dans la justification « algues unicellulaires » ? Ou la présence de chlorophylle associée à la nutrition photosynthétique devient-elle dominante par rapport au caractère procaryotique ? Ou, enfin, l'étudiant n'a t-il pas réalisé que cette espèce est bactérienne (lecture trop rapide ?).

Nous pourrions citer d'autres exemples de ce type. Seule une étude individuelle, au cas par cas, des étudiants assignés dans la catégorie par défaut « Autre » permettrait l'identification des changements de logique et de mieux délimiter le domaine de validité d'une conception donnée pour ces étudiants et, de plus, aiderait à caractériser le type d'espèce qui pose problème.

Quittons cette discussion des différentes conceptions et de la catégorie par défaut « Autre », et recherchons si certains étudiants explicitent la tension relative à la polysémie du concept de végétal.

4.1.4. Une explicitation spontanée très faible de la pluralité du concept de végétal (QR1b)

Bien qu'en l'absence de question appelant ouvertement à présenter une pluralité de définition des végétaux, 11 étudiants indiquent spontanément l'existence de plusieurs définitions dans la première question ouverte, soit 3,3 % sur l'échantillon total des 333 étudiants. Il s'agit donc d'une très faible proportion des étudiants. Trois étudiants, parmi les 38 catégorisés comme « indécis », manifestent un véritable recul sur le concept de végétal, expliquant le fait qu'ils ne se prononcent pas pour plusieurs espèces.

> • Étudiant 7 : « La notion de végétal et sa définition **dépend du critère** qu'on considère. Si l'on considère la capacité de photosynthèse alors une cyanobactérie sera considérée comme un végétal. Cependant on omettra les plantes parasites qui n'effectuent pas la photosynthèse... On peut aussi considérer que seules les **plantes terrestres** le sont mais dans cas le caractère photosynthétique ne "marche" plus. Le cas particulier d'*Elysia* [*Mollusque Gastéropode marin*] qui vole les chloroplastes permet aussi de mettre en évidence que le **caractère photosynthétique**, seul, ne suffit pas à définir un végétal. »
>
> • Étudiant 244 : « Les végétaux sont des organismes **fixés** ou non qui réalisent la **photosynthèse** et qui donc sont autotrophes pour le carbone. **Du point de vue des écosystèmes**, les végétaux sont à la base des réseaux trophiques et donc des chaînes alimentaires et constituent donc les producteurs primaires. La **définition au sens phylogénétique** du terme d'un végétal a beaucoup changé au fil des siècles. Les végétaux sont généralement constitués d'une racine, d'une tige et de feuilles. Génétiquement parlant, un végétal a une souplesse beaucoup plus grande qu'un animal et la fréquence de polyploïdisation y est beaucoup plus grande. »
>
> • Étudiant 263 : « Tout dépend du public, à savoir **si on se limite à la lignée verte ou s'y on intègre tous les organismes photosynthétiques**. Ainsi la lignée verte sera plus **restrictive** et aura une donnée **phylogénétique** tandis que tous les organismes **photosynthétiques**, incluant donc des bactéries (cyanobactéries) et des Eucaryotes, des algues et des plantes à fleurs, etc.... correspondra plus à la **vision populaire**. Après si on part sur l'étymologie, un végétal est un organisme à vie fixée et un animal est mobile. Ce qui ne correspond à aucune classification. Enfin bref, la notion de végétal **dépend** (comme tout mot, quelque soit le langage) à la fois de celui qui l'emploie et de celui qui l'entend et **je serais bien en peine de donner une définition définitive à cette première question**. »

Ces trois exemples montrent que le fait de ne pas se prononcer pour au moins deux espèces (ce que nous avons nommé, de façon discutable, « indécision ») peut correspondre à un recul réel par rapport au concept de végétal.

Parmi les espèces proposées en question 2, deux sont des Eucaryotes unicellulaires présentant des caractéristiques mi-animales (comme la mobilité ou l'absence de paroi pour l'euglène) et

mi-végétales (la présence de chlorophylle et la réalisation de photosynthèse), comment les étudiants considèrent-ils ces deux espèces ? Rencontrent-ils des difficultés particulières ?

4.1.5. Les difficultés concernant les eucaryotes unicellulaires (QR1c)

Nous avons mené deux analyses complémentaires permettant d'identifier d'éventuelles difficultés à propos des Eucaryotes unicellulaires. Nous les présenterons successivement.

- **Importance du nombre de réponses « Ne sais pas »**

L'analyse de l'occurrence des réponses « Ne sais pas » montre une répartition non homogène entre les treize espèces, qu'il s'agisse de l'échantillon total des 333 étudiants ou, seulement, des 295 étudiants « non indécis »[33]. Le nombre de réponses NSP varie de zéro pour la souris (*Mus*) et la plante à fleurs (*Andromeda*) à 48 pour la diatomée Surirella.

	NSP (333)	NSP (295)	% par rapport aux 333	% par rapport aux 295
Surirella	48	26	14,4	8,8
Euglena	47	25	14,1	8,5
Fucus	17	6	5,1	2,0
Synechococcus	13	5	3,9	1,7
Palmaria	13	2	3,9	0,7
Amanita	12	2	3,6	0,7
Orobanche	10	9	3,0	3,1
Halichondria	5	2	1,5	0,7
Ulva	4	1	1,2	0,3
Polypodium	2	0	0,6	0,0
Larix	1	1	0,3	0,3
Andromeda	0	0	0,0	0,0
Mus	0	0	0	0,0
Total	172	79		

Tableau 12 : nombre et % d'étudiants répondant NSP pour chaque espèce. Les chiffres sont calculés pour l'effectif total (333) ou bien seulement pour les 295 étudiants « non indécis »

De façon très visible, le graphique qui suit représente cette différence de répartition des réponses NSP (cf. figure 24).

[33] Rappelons que les étudiants « non indécis » ont répondu moins de deux fois NSP pour les douze premières espèces.

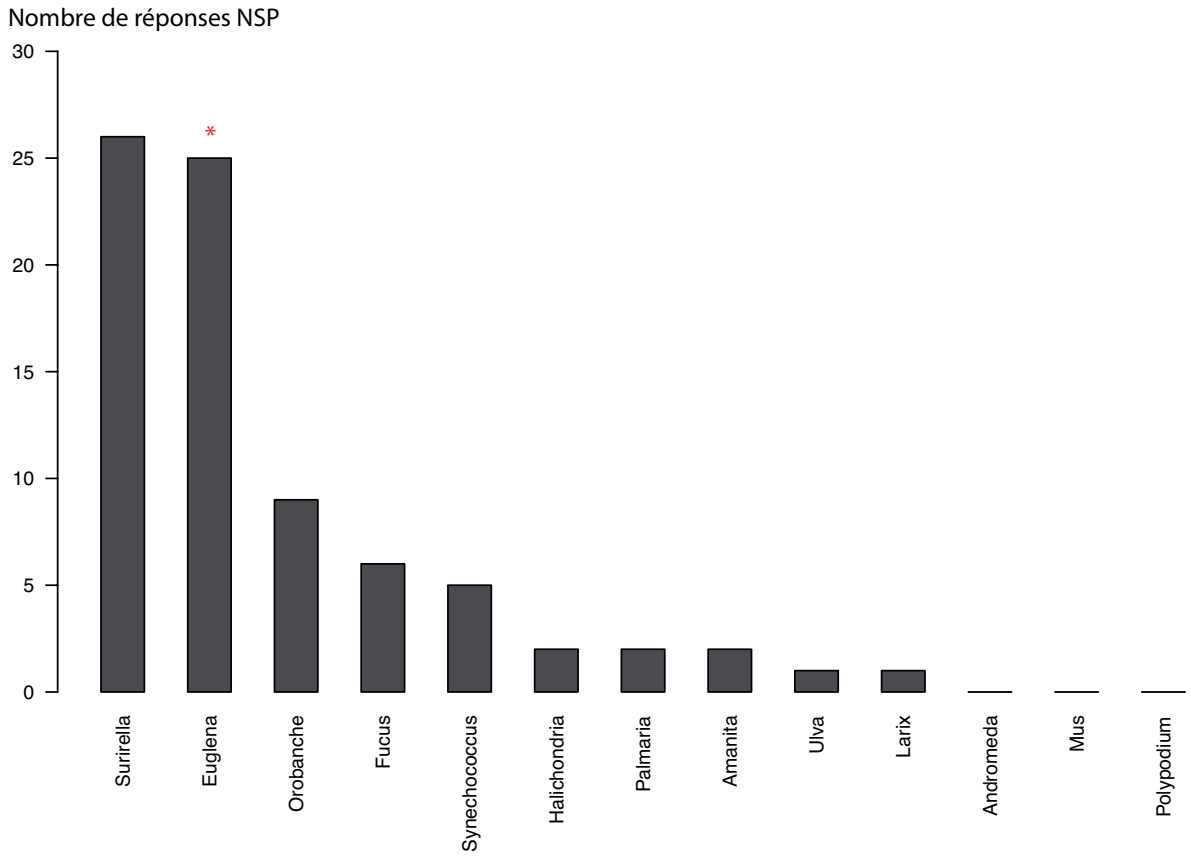


Figure 24 : graphique du nombre de réponses NSP (« ne sais pas ») pour chaque espèce (échantillon de 295 étudiants « non indécis »). * : différence statistiquement significative

Si le nombre de réponses NSP était distribué de façon équiprobable entre les 13 espèces, on s'attendrait à observer 6 réponses NSP par espèce (car nous avons obtenu 79 réponses NSP pour 13 espèces). Si nous comparons cette valeur théorique aux effectifs observés, les deux espèces Euglena et Surirella manifestent une surreprésentation nette de réponses NSP avec quatre fois plus de réponses NSP. Le test du Chi2 d'homogénéité appliqué à l'échantillon de 295 étudiants montre de manière très significative que le nombre de réponses NSP n'est pas distribué de façon homogène entre les treize espèces (p.value[34] $< 2{,}2e^{-16}$, valeur seuil inférieure).

Nous pouvons donc conclure que les deux espèces eucaryotiques unicellulaires, *Euglena* et *Surirella*, posent plus de difficultés aux étudiants que les autres espèces pour les classer ou non parmi les végétaux.

[34] La p-value (que l'on pourrait traduire valeur-p) est la probabilité d'obtenir la même valeur du test statistique si l'hypothèse nulle H_0 d'absence d'effet était vraie. Si cette p-value est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini (ici 5 %, soit 0,05), on rejette l'hypothèse nulle. La p-value est donc la probabilité de commettre une erreur de première espèce et donc d'obtenir un faux positif.

- **Importance du nombre d'arguments d'emboîtement (inclusion ou exclusion)**

L'argument d'inclusion ou d'exclusion peut être plus ou moins explicite dans les réponses des étudiants. Il s'agit notamment d'une simple mention du groupe systématique, Gymnospermes par exemple, comme argument permettant de soutenir la nature végétale de l'espèce[35]. Il peut également s'agir d'une argumentation beaucoup plus explicite, comme l'indiquent les exemples suivants :

• Argumentation d'inclusion

> Étudiant 68 (*Andromeda*) : « Il s'agit d'un Angiosperme qui est une classe dans le règne végétal »
>
> Étudiant 74 (*Andromeda*) : « Les Angiospermes sont les plantes à fleurs donc des végétaux »
>
> Étudiant 151 (*Polypodium*) : « C'est un Ptéridophyte (fougère) donc c'est un végétal ».

• Argumentation d'exclusion

> Étudiant 43 (*Mus*) : « C'est un mammifère donc pas un végétal »
>
> Étudiants 130 et 131 (*Euglena*) : « Ce n'est pas un végétal, c'est un Protiste ».
>
> Étudiant 54 (*Fucus*) : « Photosynthèse donc pas un champignon. Eucaryote donc pas une bactérie. Paroi cellulaire donc pas animal ». Il y a ici mobilisation de caractères pour exclure le fucus de trois groupes considérés comme disjoints des végétaux. Il existerait 4 groupes d'êtres vivants : champignons, bactéries, animaux et végétaux. Puisque le fucus n'appartient pas aux trois premiers groupes, alors il appartient au 4^{e} : les végétaux.
>
> Étudiant 156 (*Amanita*) : « Les champignons ne sont pas végétaux : ce sont des champignons »
> Étudiant 164 (définition des végétaux en question 1) : « Les végétaux rassemblent ce qui n'est ni animal (métazoaires) ni minéral (attention aux mycètes et aux protistes dont la classification est ambigüe). »

La figure 25 présente le nombre d'étudiants qui utilisent des arguments d'inclusion ou d'exclusion selon chaque espèce, ordonnée de façon décroissante.

[35] Les mentions « Eucaryote » et « Procaryote » n'ont pas été considérées comme groupes emboîtés (bien que cela soit un choix méthodologique discutable). En effet, nous l'avons fourni dans la liste de caractère comme attribut qualifiant le type de cellule (cellule de type Procaryote ou Eucaryote). Il y a donc ambiguïté pour ces deux mots entre le caractère de structure cellulaire et le groupe systématique (sachant que seul le groupe des Eucaryotes est monophylétique). Pour ne pas risquer de « sur-interpréter » dans le sens d'un raisonnement par emboîtement, nous ne les avons donc pas considéré dans cette étude quantitative.

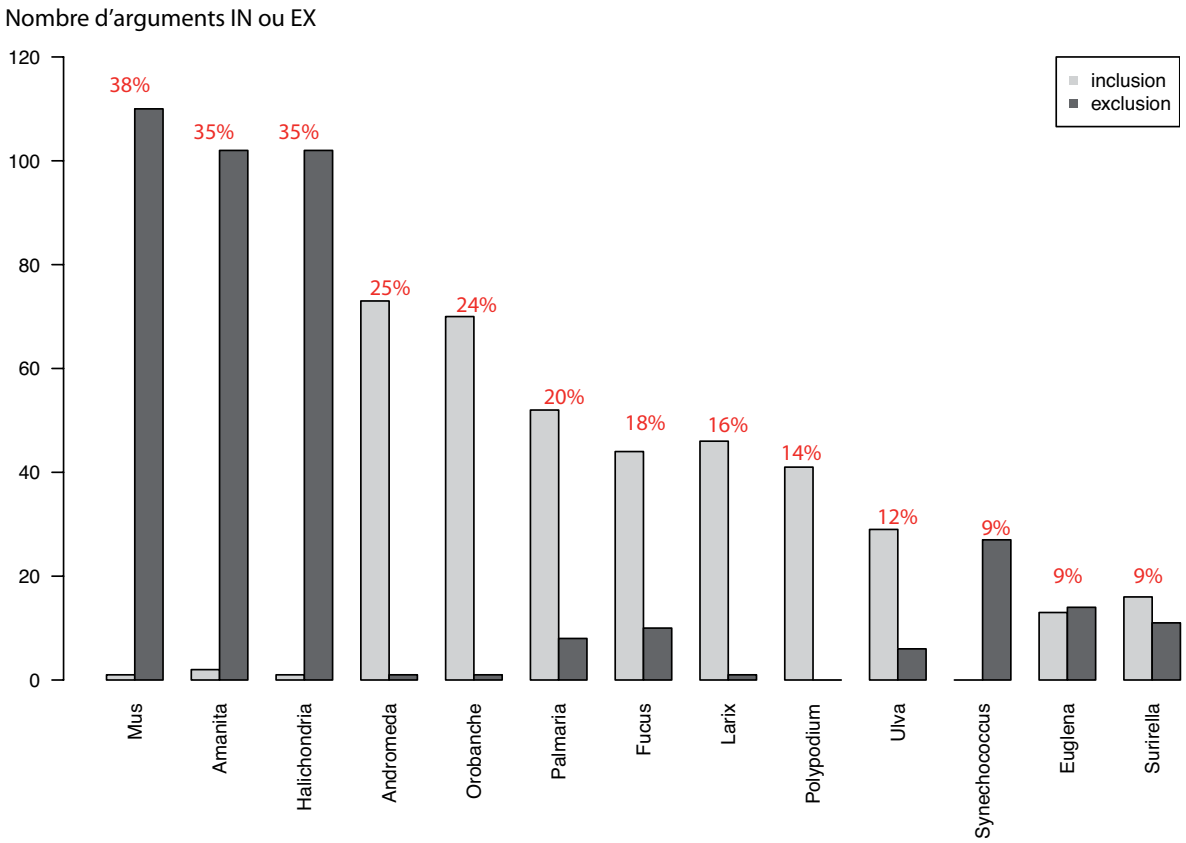


Figure 25 : graphique du nombre d'étudiants mobilisant des arguments d'inclusion ou d'exclusion selon chaque espèce. Le pourcentage est calculé sur l'échantillon de 295 étudiants « non indécis » en sommant les arguments IN et EX.

Trois espèces déclenchent une argumentation d'exclusion chez plus d'un tiers des étudiants. Il s'agit de la souris (*Mus*), de l'éponge (*Halichondria*) du groupe des Métazoaires et de l'amanite (*Amanita*), du groupe des Eumycètes. À l'opposé, les trois espèces unicellulaires : *Synechococcus*, *Euglena* et *Surirella*, déclenchent un raisonnement d'emboîtement chez moins d'un étudiant sur dix seulement, soit quatre fois moins que les trois espèces précédentes. La comparaison du nombre d'arguments d'emboîtement : inclusion ou exclusion pour chacune des treize espèces par un test de Chi2 d'homogénéité montre que certaines espèces déclenchent ce raisonnement davantage que d'autres (p.value $<2.2e^{-16}$, valeur seuil inférieure).

Nous pouvons supposer que ces espèces qui déclenchent le plus ce type de raisonnement sont celles appartenant à des groupes dont la validité n'a pas été questionnée par les étudiants. Par contre, la faible mobilisation de ce type d'arguments pour les organismes unicellulaires pourrait être interprétée comme une plus grande difficulté à positionner ces espèces au sein ou à l'extérieur des végétaux. Notons la différence entre la cyanobactérie *Synechococcus* dont le recours à ce type d'argument ne concerne qu'une exclusion des végétaux (EX) alors que dans

le cas des deux Eucaryotes unicellulaires les réponses restent partagées : moitié exclusion et moitié inclusion au sein des végétaux.

Achevons notre étude des conceptions convoquées dans le cadre d'une situation ouverte de classification, par la réalisation de la présentation des différents modes de raisonnement qui peuvent constituer des obstacles.

4.1.6. Les obstacles mobilisés (QR1d)

En plus des trois obstacles étudiés précédemment que nous allons de suite brièvement rappeler, discutons ici de quatre autres modes de raisonnement qui font appel soit à une supposée hiérarchie des êtres vivants, soit au primat de la perception, soit à un cloisonnement disciplinaire entre biologie animale et biologie végétale ou, soit, enfin, à une pensée essentialiste.

- **Pensée prototypique, macrocentrisme et pensée catégorielle**

La présentation des cinq conceptions définies par l'analyse *a priori* puis la discussion des résultats a permis d'analyser, tour à tour, le recours à la pensée prototypique dans le cadre de la conception fonctionnelle et cellulaire (cf. p. 97 et 121), au macrocentrisme dans le cadre de la conception fonctionnelle macrocentrée (cf. p. 98 et 122) et ensuite à la pensée catégorielle dans le cadre de la conception par opposition (cf. p. 97 et 124). Nous ne jugeons pas utile ici de reprendre l'analyse de ces modes de raisonnement réalisée lors de la discussion des trois conceptions concernées. Néanmoins, il nous semble essentiel de souligner leur importance dans cette section consacrée aux obstacles.

- **Hiérarchie du vivant**

Douze étudiants explicitent l'idée d'une hiérarchie des êtres vivants ou d'un degré d'évolution dans leur définition des végétaux ou, aussi, dans l'argumentation développée en question 2. Les trois citations suivantes illustrent clairement ce type de raisonnement.

> • Étudiant 39 : « Les végétaux regroupent différentes "familles" telles que :
>
> - la lignée verte (="les plantes supérieures")
>
> - les algues (rouges, brunes et vertes). (…) »
>
> • Étudiant 48 : « Les végétaux sont un groupe d'êtres vivants dont la caractéristique commune est d'effectuer la photosynthèse. On y regroupe **les plantes dites "supérieures" (Angiospermes…) et "inférieures" (mousses…)** mais aussi les algues et d'autres unicellulaires (Chlamydomonas...). (…) »

• Étudiant 333 : « (…) Leur composition cellulaire varie de celle des animaux par la présence de plaste et de vacuole et de cellule délimitée par une paroi pecto-cellulosique (**pour les végétaux les plus évolués)**. », *c'est nous qui soulignons.*

Il semble d'ailleurs frappant de constater que pour certains étudiants les plantes supérieures seraient des Angiospermes alors que pour d'autres ce serait la lignée verte. Étonnamment, il y aurait donc supérieur et supérieur !

Cette idée d'une hiérarchie du vivant reste un héritage de l'échelle des êtres. Nous aurons l'occasion d'en discuter l'importance dans le chapitre 3 consacré à l'histoire des sciences, à travers sa mise en jeu dans les classifications gradistes. Bien que visible dans notre corpus au niveau master 2, cet obstacle qui fait appel à un jugement de valeur non scientifique, reste tout de même peu présent avec seulement 4 % des réponses environ.

- **Primat de la perception : importance accordée à la couleur verte de l'organisme**

Nous avons codé le recours à une argumentation fondée sur la couleur verte de l'organisme, attribuant à cette seule couleur la présence de chlorophylle (codé M5). Six étudiants ont recours à ce mode de raisonnement. Les deux citations qui suivent explicitent ce raisonnement dans lequel la couleur de l'organisme n'est attribuée qu'à la présence unique d'un pigment et non par une association pigmentaire, dont la couleur résultante masque la présence de chlorophylles, pourtant présentes.

• Étudiant 31 : *Fucus* non végétal car « Le fucus ne possède **pas de chlorophylle** qui est un critère pour être un végétal »

• Étudiant 122 : Q1 : « Les végétaux sont un groupe d'organismes vivants comprenant des êtres unicellulaires et pluricellulaires. Les caractéristiques principales de ce groupe dont :

- présence de noyaux dans les cellules (Eucaryotes)

- immobilité

- présence de pigments particuliers.

On généralise principalement les végétaux aux végétaux verts contenant de la chlorophylle mais certains végétaux en sont dépourvus (algues brunes par exemple) », *c'est nous qui soulignons.*

Lors de notre enquête exploratoire (2014), des entretiens individuels ont montré une problématisation scientifiquement erronée dans laquelle des étudiants de M2 s'appuyaient sur ces contraintes : absence de couleur verte interprétée comme l'absence de chlorophylle, pour construire la nécessité d'une nutrition hétérotrophe des algues rouges et brunes. Elle traduit la prédominance du niveau macroscopique, constituant un élément du registre empirique

sensoriel, face au registre théorique. Astolfi & Peterfalvi (1993, p. 109) parlent de l'obstacle transversal « primat de la perception sur la conceptualisation ». Cet obstacle est peut être renforcé de façon didactique par certains enseignements de physiologie végétale à l'université dont les modèles sont bien souvent uniquement des « organismes verts ».

De façon corrélée, notre regard se porte sur la compréhension des étudiants concernant l'expression « lignée verte » qui désigne un groupe monophylétique comprenant les algues rouges, les Glaucophytes et les Chlorobiontes (algues vertes et plantes terrestres).

Les exemples suivants montrent que des étudiants excluent les algues rouges de la lignée verte, puisque les algues rouges ne sont pas vertes ! La liste n'est pas exhaustive mais nous désirons montrer par la diversité des citations que ce type de réponse n'a rien de ponctuel. 15 réponses de ce type ont été répertoriées.

> • Étudiant 25 (*Palmaria*) « C'est un peu la même situation que fucus. Si par végétal on entend présent dans la **lignée verte**, alors ce n'est pas un végétal, mais selon les critères que j'ai donné en définition ça en serait un… »
>
> • Étudiant 149 : Q1 : « Les végétaux regroupent des êtres vivants appartenant **à la lignée verte mais aussi les Rhodophytes** et les champignons ainsi que les bactéries photosynthétiques (procaryote). »
>
> • Étudiant 172 (*Palmaria*) : « Les **Rhodobiontes** n'appartiennent cependant pas à la **lignée verte** »
>
> • Étudiant 226 : Q1 : « Sens large : tout ce qui est photosynthétique eucaryote. Mais contient :
>
> - **Algues rouges**, Rhodophytes; Algues brunes, Chromophytes (Protozoaires); Algues vertes, Chlorophytes
>
> - Lignée verte (algues vertes + végétaux sup) »
>
> • Étudiant 245 : Q1 : « Ils colonisent différents milieux (aquatiques, terrestres) et sont composés de différentes lignées évolutives dont la **lignée verte** caractérisée par des pigments photosynthétiques (chlorophylle a, b...), la **lignée rouge** (Rhodophytes) et autres. »
>
> • Étudiant 265 (*Palmaria*) : « Il s'agit d'une algue **rouge** : végétal mais qui n'appartient pas à la **lignée verte** »
>
> • Étudiant 270 (*Palmaria*) : « Il s'agit d'une algue **rouge** (il n'appartient pas à la **lignée verte**) », *c'est nous qui soulignons.*

Deux interprétations nous semblent envisageables pour expliquer cette difficulté. Il s'agit de la mise en jeu de l'obstacle du primat de la perception qui associe la couleur verte au niveau macroscopique à la présence de chlorophylle. Cela pourrait provenir aussi d'une difficulté verbale, liée à l'usage du terme « vert », pour qualifier un groupe systématique. Dans le langage courant, le vert n'est, en effet, pas le rouge ou le brun !

Ce résultat didactique semble de nature à interroger l'usage de l'expression « lignée verte », présente dans des ouvrages français de référence en phylogénie, tel celui de Lecointre & Le Guyader (2001), très consulté par les étudiants. En raison de la polysémie du terme Plantae, nous suggérons de préférer l'utilisation du terme Archaeplastida qui se réfère à l'acquisition du plaste à deux membranes par endosymbiose primaire d'une cyanobactérie.

- **Importance accordée au cloisonnement disciplinaire distinguant biologie animale et végétale**

Pour inclure une espèce parmi les végétaux, 5 étudiants utilisent comme argument le fait qu'elle ait été étudiée dans l'enseignement de biologie végétale à l'université ou dans le secondaire : programme de sixième, manuels scolaires de SVT ou modèle expérimental pour réaliser des travaux pratiques. Notons que ces arguments ne sont jamais utilisés pour des plantes terrestres et le sont, dans quatre cas sur cinq, pour les deux espèces eucaryotiques unicellulaires. Le recours à ce type d'argument non scientifique peut constituer un indice supplémentaire de la difficulté à classer ces espèces.

> • Étudiant 35 : *Surirella* NSP : « J'hésite car c'est un peu animal avec les deux valves. Mais je l'ai **étudié en biologie végétale**. Donc je dirai oui. Mais c'est utilisé en géologie comme fossile. D'où le doute. Est-ce animal ou végétal. Voilà pourquoi j'ai mis je ne sais pas, **même si j'aurai dit végétal car c'est en biologie que j'ai vu son cycle »**
>
> • Étudiant 110 : *Fucus* V : « Je l'ai étudié en cours de biologie végétale ». *Polypodium* : « Il est étudié en classe de 6e dans la partie "Colonisation des milieux par les végétaux" »
>
> • Étudiant 183 : *Euglena* V : « Je me rappelle **d'un cours** et on l'a mis dans les végétaux »
>
> • Étudiant 280: *Euglena* V : « Car utilisé dans de nombreuses **expériences en SVT** sur les végétaux dont la photosynthèse »
>
> • Étudiant 305 : *Euglena* NSP : « Son utilisation dans **les manuels scolaires** comme étant classés dans la classification des végétaux me fait douter », *c'est nous qui soulignons.*

Bien que peu présent dans notre corpus, seulement 1,5 % des réponses, ce type d'argumentation nous semble intéressant à souligner. Il révèle que l'existence de disciplines identifiées dans l'enseignement peut constituer une aide pour les étudiants car elle leur permet de clarifier ce qui relève ou non de son champ d'étude. Mais, notons également que ce cloisonnement disciplinaire peut constituer un obstacle, au sens où il stoppe le questionnement. Si une espèce est étudiée dans un cours de botanique, c'est qu'elle est végétale. Alors, à quoi bon se questionner sur les caractéristiques fondant cette catégorie classificatoire, sur l'évolution historique de ce groupe et sa polysémie ? Étant lié à une

organisation de l'enseignement, cet obstacle peut être qualifié de didactique. Mais ce cloisonnement existant aussi d'un point de vue institutionnel - plus largement que dans le cadre de l'enseignement - cet obstacle donc, pourrait également être de nature sociologique, selon la typologie des obstacles proposée par Pierre Clément (2014, p. 141).

- **Le recours à une pensée essentialiste ?**

La souris arrive en tête du palmarès de l'argumentation par exclusion explicite (cf. figure 25). Elle mérite une attention particulière. Pour certains étudiants, la non-appartenance de la souris aux végétaux est tellement évidente qu'ils en viennent à répondre, étonnamment, de manière ironique et humoristique. En témoignent les quatre réponses de la figure 26.

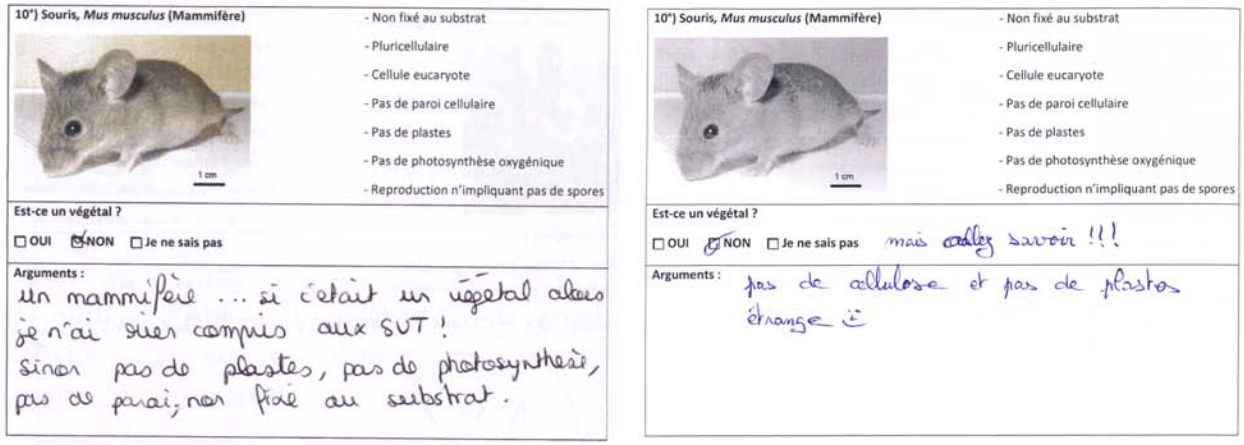


Figure 26 : quatre réponses concernant la souris (*Mus*) soulignent une certaine ironie. GFP : green fluorescent protein, utilisée fréquemment en biologie moléculaire comme marqueur de l'expression d'un transgène et donnant une couleur verte en éclairant avec des UV

Comment interpréter ces réponses et quelle est la nature du raisonnement sous-jacent ?

L'exclusion de la souris du groupe des végétaux est argumentée, dans certains cas, par l'absence des caractéristiques définissant les végétaux pour ces étudiants. C'est l'exemple fourni par l'étudiant 61. Celle-ci précise que la souris ne possède pas de cellulose et de plastes, caractères qui ont été indiqués en question 1 et qui définissent les végétaux. L'ajout des traits d'humour « Mais allez savoir !!! » et « étrange ☺ » semble indiquer que les deux groupes animaux et végétaux s'excluent de façon évidente et qu'il n'est ni questionné, ni questionnable. C'est également le cas de l'étudiant 172 qui fournit comme seule justification :

« Est-il réellement utile d'argumenter ? ». Or, l'étude du concept de végétal, réalisée au chapitre précédent, a montré à quel point la polysémie de ce concept est forte, un concept, utilisé dans des sens différents selon les contextes et les disciplines biologiques et qui, dans l'histoire, a fortement évolué. La photosynthèse peut apparaître, puis disparaître, au cours de l'évolution. Elle est réalisée chez des animaux à partir de partenaires symbiotiques (e.g. les coraux) ou chez des animaux qui acquièrent des plastes à partir des algues ingérées (cf. le mollusque marin Elysia, p. 37). Face à un problème aussi complexe que celui de la définition des végétaux, nous ne pouvons que nous interroger sur le sens à donner à ces réponses ironiques qui, d'ailleurs, ne concernent pas que la souris.

Il nous semble possible que certains étudiants aient eu recours à une pensée essentialiste qui les conduisent à réifier des groupes systématiques dont l'existence ne serait pas questionnée, alors même que, d'un point de vue épistémologique, les groupes sont des constructions humaines.

Nous touchons là une limite forte du recueil de données par questionnaire qui ne permet pas d'interpréter avec assurance ces quelques touches d'ironie et d'humour. Des entretiens individuels seraient nécessaires afin de mieux comprendre les fondements de telles réponses.

Nous aurons l'occasion de préciser le recours à ce type de raisonnement dans le cas de la plante à fleur non chlorophyllienne : l'orobanche.

Jusqu'à présent, nous avons exploré le raisonnement mobilisé dans le cadre d'une situation ouverte de classification sans imposer de registre explicatif. Quelles sont les relations entre les réponses obtenues et la nature des questions qui correspondent à différentes situations de classification : écologique puis phylogénétique ? Comment s'articulent les raisonnements fonctionnel et phylogénétique, en particulier dans le cas d'une espèce problématique : l'Angiosperme non chlorophyllienne ?

4.2. Résultats concernant la relation entre les logiques de réponses et les situations de classification (QR2)

Cette section porte sur la deuxième famille de questions de recherche. Celle-ci concerne la relation entre les logiques de réponses et les situations de classification. Elle cherche à comprendre la manière dont les étudiants articulent les raisonnements fonctionnel et phylogénétique.

4.2.1. La relation entre la situation de classification et le type de réponses dans un registre explicitement écologique puis phylogénétique (QR2a)

Pour chaque question 3 et 4, nous analyserons les réponses des étudiants dans le registre considéré (écologique ou phylogénétique) puis, ensuite, nous les comparerons avec celles avancées dans le cadre de la situation ouverte, ceci dans le but d'identifier les cohérences de réponses ou d'éventuelles dissonances.

- **Étude des réponses dans le cadre d'une situation écologique**

➢ **Analyse des réponses à la troisième question écologique**

La troisième question porte sur le registre écologique : « Quelle est l'importance fonctionnelle des végétaux dans les écosystèmes ? ». Il s'agit d'une question ouverte. Seuls cinq étudiants, soit 1,7 %, ne se prononcent pas sur cette question. La liste des arguments avancés par les étudiants est présentée dans le tableau 13 de façon codée, chacun de ceux-ci se trouve explicité dans le tableau 14. Dans ce dernier, nous n'avons consigné que les arguments avancés par plus de 5% des questionnés.

	E2	**E1**	**E10**	**M6**	**M1**	**E8**	**E4**	**M2**	**E7**	**E9**	**U1**	**E11**	**E6**	**E23**	**M7**	**E18**	**E5**
N	220	180	114	91	88	60	51	49	48	28	24	22	21	18	18	16	16
%	74,6	61	38,6	30,8	29,8	20,3	17,3	16,6	16,3	9,5	8,1	7,5	7,1	6.1	6.1	5,4	5,4

Tableau 13 : arguments codés présentés par ordre décroissant. N : nombre et % : pourcentage calculé sur l'effectif de 295 étudiants « non indécis »[36]

Base des chaînes alimentaires / réseaux trophiques	E2
Producteur primaire	E1
Renouvellement de l'O_2 atmosphérique; oxygénation de l'atmosphère primitive	E10
Transformation de matière minérale en matière organique	M6
Photosynthèse oxygénique (ou photosynthèse ou phototrophie)	M1
Structurent les paysages / Constituent l'habitat d'autres EV / Biotopes / Biomes	E8
Rôle dans les cycles biogéochimiques (C, N...)	E4
Autotrophie (au C, à N, etc.)	M2
Participation à la formation et évolution du sol (origine importante de la MO des sols, altération de la R. mère, échanges hydro-minéraux)	E7
Limitent l'érosion des sols, rôle mécanique	E9
Ressource pour l'Homme	U1
Organismes pionniers; "sortie" des eaux	E11
Relations interspécifiques (autre que prédation) comme la symbiose…	E6

[36] Tous les pourcentages indiqués par la suite, sauf indication contraire, sont calculés sur la base du jeu de données restreint aux 295 étudiants « non indécis ».

Rôle d'épurateur (des sols, de l'air), anti-pollution, anti-réchauffement climatique (effet de serre) / action climatique	E23
Conversion énergie lumineuse en énergie chimique	M7
Importance dans la biodiversité dépendante des végétaux	E18
Entrée d'énergie dans les cycles biogéochimiques et peut se fossiliser : ressources énergétiques fossiles : charbon...	E5

Tableau 14 : liste des arguments pour chaque code, par importance quantitative décroissante

Les deux réponses les plus communes qui arrivent très largement devant les autres arguments, sont :

- les végétaux qui sont à la base des chaînes alimentaires et des réseaux trophiques pour 220 étudiants, soit 74,6 %,
- les végétaux qui sont des producteurs primaires pour 180 étudiants, soit 61 %.

Certains étudiants ont schématisé les relations trophiques au sein d'un écosystème. Ils y placent les végétaux en tant que producteurs primaires. La figure 27 en présente un exemple.

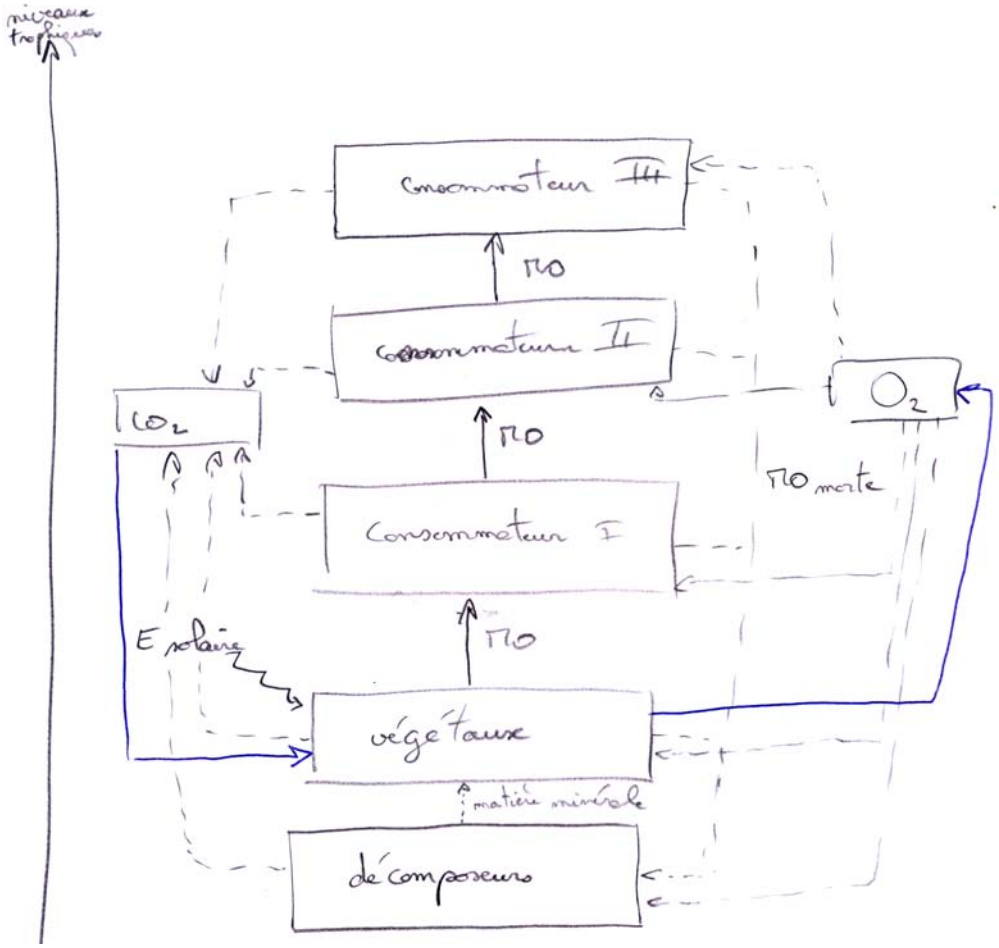


Figure 27 : schématisation réalisée par l'étudiant 244 du rôle des végétaux dans les écosystèmes

➢ Comparaison avec les arguments du registre écologique avancés en question 1 : une conception centrée sur l'échelle individuelle et non écosystémique

L'analyse de la première question ouverte montre que les étudiants ne définissent pas spontanément les végétaux à l'échelle écosystémique, mais à celle de l'organisme. En effet, 224 de ceux-ci, soit 76 %, n'avancent pas d'arguments du registre écologique en question 1, alors qu'ils manifestent des connaissances écologiques en question 3.

L'échelle écosystémique ne correspond pas au premier niveau d'intégration du vivant mobilisé pour définir les végétaux dans la situation ouverte. En première approche, les étudiants raisonnent sur les végétaux en tant qu'individus et lorsque cela ne leur semble pas suffisant, ils envisagent d'autres types de relations. Ils passent alors du niveau objectal au niveau inter-objectal, en référence aux travaux de Piaget & Garcia (1983). En effet, ces auteurs montrèrent, sur le plan psychogénétique qu'il y a d'abord centration sur le niveau de l'objet étudié, appelé niveau objectal, avant de passer au niveau des relations entre l'objet et son milieu : niveau inter-objectal, puis au niveau trans-objectal, ce qui a permis de dégager des « lois » générales.

Pour les conceptions fonctionnelles (*s. l.*) que nous avons caractérisées dans une situation ouverte de classification, le problème mobilisé apparaît être davantage physiologique (nutrition de l'individu) qu' écologique (relations entres individus et avec leur milieu).

- **Étude des réponses dans le cadre d'une situation phylogénétique**

➢ Analyse des réponses à la quatrième question phylogénétique

La grande majorité des étudiants : 208, soit 70,5 %, répond à la dernière question relative à la classification phylogénétique actuelle que les végétaux ne constituent pas un groupe monophylétique. Une part non négligeable des étudiants ne se prononce pas : 52 étudiants, soit 17,6 %, et une dernière répond que les végétaux constituent un groupe systématique actuellement valide (35 étudiants soit 11,9 %). Ce résultat est à mettre en relation avec le programme du concours préparé par ces étudiants de CAPES SVT, dans lequel figure la classification phylogénétique.

• Argumentation concernant la non-monophylie des végétaux

Parmi les 208 étudiants concernés, les arguments les plus fréquents utilisés les suivants :

- ils ne partagent pas d'ancêtre commun exclusif : 54 étudiants ;
- ils forment un groupe polyphylétique : 40 étudiants ;
- on retrouve des végétaux dans différentes branches de l'arbre : 34 étudiants ;

- l'origine des plastes et de la photosynthèse est multiple. Il s'agit d'une homoplasie : 20 étudiants ;
- ils forment un groupe paraphylétique : 18 étudiants ;
- ils correspondent à des organismes ayant des caractéristiques différentes et sans caractères propres : 15 étudiants.

Un quart de ces étudiants : 54 sur 208, n'a pas justifié la réponse ou a répondu de façon décalée.

Le tableau 15 montre quatre exemples d'arbres phylogénétiques, schématisés spontanément par des étudiants pour justifier leur réponse.

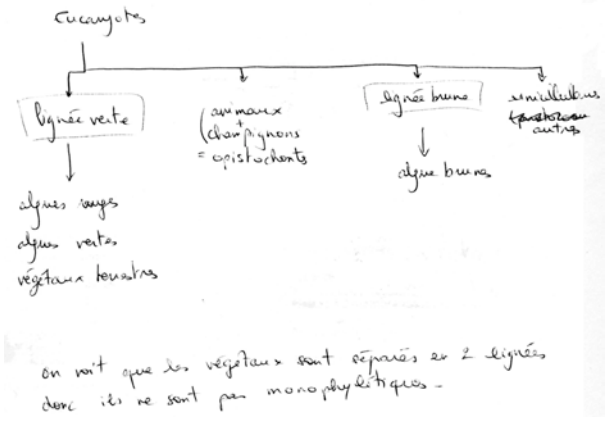
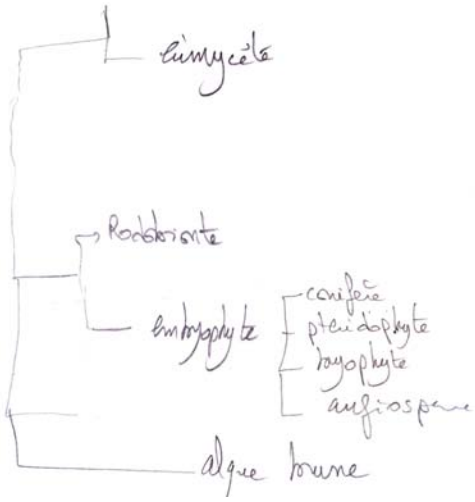
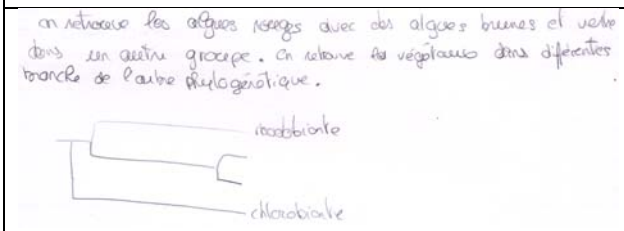
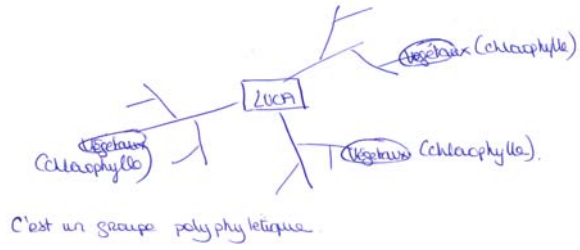
Étudiant 188	Étudiant 266
	
Étudiant 41	**Étudiant 238**
	

Tableau 15 : arbres phylogénétiques représentés par des étudiants en question 4 pour justifier la non-monophylie des végétaux

• Argumentation concernant la monophylie des végétaux

Parmi les 35 étudiants affirmant que les végétaux constituent un groupe valide dans la classification phylogénétique actuelle, les arguments les plus fréquents sont les suivants :

- ils partagent des caractères spécifiques : 10 étudiants ;
- ils partagent un ancêtre commun : 7 étudiants ;

- ils possèdent des caractéristiques partagées comme des plastes : 7 étudiants, une paroi : 5 étudiants, la photosynthèse : 3 étudiants, la cellulose : 2 étudiants, et la chlorophylle : 2 étudiants.

Notons que 9 de ceux-ci, répondant que les végétaux sont monophylétiques, n'ont pas justifié leur réponse ou ont répondu de façon décalée.

Par ailleurs, les étudiants ayant répondu que les végétaux sont monophylétiques n'ont pas pour autant tous défini ce groupe de façon phylogénétique dans la situation ouverte.

• Argumentation des étudiants ne se prononçant pas (NSP)

52 étudiants ne se prononcent pas et, pour la très grande majorité : les trois quarts ne se justifient pas, ou de façon décalée, et n'argumentent pas leur hésitation.

- **Comparaison de la réponse à la question phylogénétique avec les conceptions distinguées dans la situation ouverte**

• La conception CFM2 est-elle mue par un problème phylogénétique ?

Avant d'étudier la relation entre les cinq types de conception et les réponses à la question 4, nous revenons sur le cas spécifique de la conception fonctionnelle macrocentrée 2 (CFM2) qui définit les végétaux comme les plantes terrestres. Nous avons eu l'occasion de nous interroger sur un éventuel fondement phylogénétique de cette conception, sachant que les Embryophytes forment un groupe monophylétique

Sur ces 9 étudiants CFM2, 2 seulement répondent que les végétaux sont monophylétiques lors de la question 4. Le premier ne justifie pas sa réponse et le second affirme que les végétaux ont un ancêtre commun. Ainsi cette faible proportion de 2 étudiants sur 9 ne permet pas de dire que cette conception CFM2 est mue par un problème phylogénétique.

• Relation entre les cinq conceptions et la réponse à la question phylogénétique ?

Existe-t-il une relation entre le type de conception mobilisée lors de la situation ouverte : questions 1 et 2, et les connaissances phylogénétiques des étudiants : réponses à la question 4 ? Pour répondre à cette dernière, nous chercherons si les deux variables : type de conception et réponse à la question 4, sont ou non indépendantes.

Le tableau 16 présente, pour chaque conception des végétaux, les réponses à la question 4.

	Végétaux : groupe monophylétique	Végétaux : groupe non monophylétique	Ne sait pas
Conception par opposition (CPO)	2	8	1
Conception fonctionnelle (CF)	1	23	3
Conception fonctionnelle et cellulaire (CFC)	13	85	23
Conception fonctionnelle macrocentrée (CFM)	3	24	4
Conception phylogénétique réduite (CPR)	4	2	2

Tableau 16 : réponses à la question 4 selon la conception des végétaux

Le test exact de Fisher est adapté à notre jeu de données dans lequel certaines classes comprennent des effectifs inférieurs à 5. Elles ne permettent pas d'utiliser le test du Chi2. La p-value étant légèrement supérieure à 0,05, nous pouvons affirmer, au risque de 5 %, que la conception des étudiants n'a pas d'incidence significative sur leur réponse à la quatrième question. Ainsi, la grande majorité, 70,5 %, a connaissance que les végétaux ne constituent pas un groupe monophylétique dans la classification phylogénétique. Cela n'influence pas leurs réponses aux deux premières questions, à partir desquelles nous avons inféré leurs conceptions des végétaux. Cependant, la conception phylogénétique réduite : CPR, attire notre attention puisque les étudiants mobilisant cette conception sont plus nombreux à penser que les végétaux sont monophylétiques, contrairement aux autres conceptions (cf. tableau 16). Nous décidons donc de regrouper les quatre conceptions : CPO, CF, CFC et CFM, non définies par rapport à un problème phylogénétique, contrairement à la CPR.

	Végétaux : groupe monophylétique	Végétaux : groupe non monophylétique	Ne sait pas
Conceptions non phylogénétiques (CPO, CF, CFC et CFM)	19	140	31
Conception phylogénétique réduite (CPR)	4	2	2

Tableau 17 : réponses à la question 4 en distinguant la conception phylogénétique réduite des quatre autres

Le test exact de Fisher est alors fortement significatif (valeur p = 0.002<0,05), ce qui permet d'affirmer que la réponse à la question 4 sur la monophylie des végétaux serait bien dépendante du traitement d'un problème phylogénétique pour définir le concept de végétal, même si cela ne concerne qu'un petit nombre d'étudiants.

Nous souhaitons étudier le cas particulier de deux étudiants CPR qui ont répondu que les végétaux ne sont pas monophylétiques. Cette réponse nous paraît contradictoire. Il s'agit des étudiants 204 et 235. Commençons l'analyse avec l'étudiant 234. Ses réponses aux questions 1 et 4 sont les suivantes :

> Étudiant 204 : Question 1 : « Les végétaux forment un groupe non monophylétique car leur autotrophie liée aux chloroplastes est issue d'endosymbioses successives dans différents groupes. La présence de chloroplastes n'est donc pas un caractère adéquat. On distingue la lignée verte (chloroplastes issus d'endosymbiose primaire) chez les végétaux contenant Ulvophytes et Embryophytes (ex-Bryophyte, ex-ptéridophytes et Angiosperme). Question 2 *Euglena* : non végétal car « appartient aux Euglénobiontes donc pas à la lignée verte donc **c'est un végétal au sens large (non monophylétique) car réalise la photosynthèse**… mais pas **au sens strict car pas de chloroplastes issus d'endosymbiose primaire** »*, c'est nous qui soulignons.*
>
> Q4 : « Car comme expliqué dans la question 1, la présence de chloroplastes n'est pas un caractère homologue dérivé car il est issu d'endosymbiose d'organismes procaryotes photosynthétiques pour endosymbiose I^{aire} et d'algue rouge pour endosymbiose II^{aire} (chez algue brune...) qui ont eu lieu à différents moments dans l'évolution... **Le groupe des végétaux ne comprend pas un ancêtre commun et tous ses descendants (lignée verte + algue rouge...)** »

Cet étudiant distingue deux conceptions des végétaux : les végétaux au sens large (i.e. conception fonctionnelle), et les végétaux aux sens strict (i.e. la lignée verte, CPR). Il a compris la question 4 comme : « les végétaux **au sens large** forment-ils un groupe monophylétique dans la classification phylogénétique et non les **végétaux tels que vous les avez défini à travers vos réponses précédentes** » ?

Le second étudiant CPR (235), répondant que les végétaux ne sont pas monophylétiques, justifie ainsi sa réponse à la question 4 :

> Étudiant 235 : « Tout dépend de la définition du mot végétal ».

Il semble donc mobiliser le même type d'argumentation que l'étudiant précédent mais de façon moins développée. A savoir : il existe une multiplicité de définitions des végétaux et la réponse à la question 4 dépend de la définition retenue pour les végétaux.

Ces deux exemples ne remettent pas en cause le fait que ces étudiants ont bien mobilisé une conception phylogénétique réduite. Ce paradoxe apparent nous montre que la formulation de la question 4 offre plusieurs interprétations possibles. Elle mériterait d'être clarifiée si le questionnaire devait être modifié pour une nouvelle enquête.

Cette analyse montre que les étudiants présentent une cohérence globale de réponses. Ils considérent davantage que les végétaux ne sont pas monophylétiques après avoir mobilisé une

conception non basée sur un problème phylogénétique et, à l'inverse, pour les étudiants mobilisant une conception phylogénétique.

À l'occasion de l'étude du raisonnement classificatoire, l'étude didactique exploratoire avait révélé le caractère fécond d'une plante à fleur non chlorophyllienne. À présent, nous souhaitons analyser les réponses des étudiants concernant la treizième espèce : une orobanche, et les mettre en parallèle de la conception mobilisée et de la réponse à la question phylogénétique.

4.2.2. La difficulté à articuler les logiques fonctionnelle et phylogénétique dans le cas d'une plante à fleur non chlorophyllienne (QR2b)

Les étudiants répondent dans leur quasi-totalité (276, soit 93,5 %) que l'orobanche est végétale. De façon graphique, la figure 28 présente les réponses des étudiants concernant cette plante à fleur non chlorophyllienne qui vit de façon parasite grâce à des suçoirs souterrains prélevant la sève de la plante hôte.

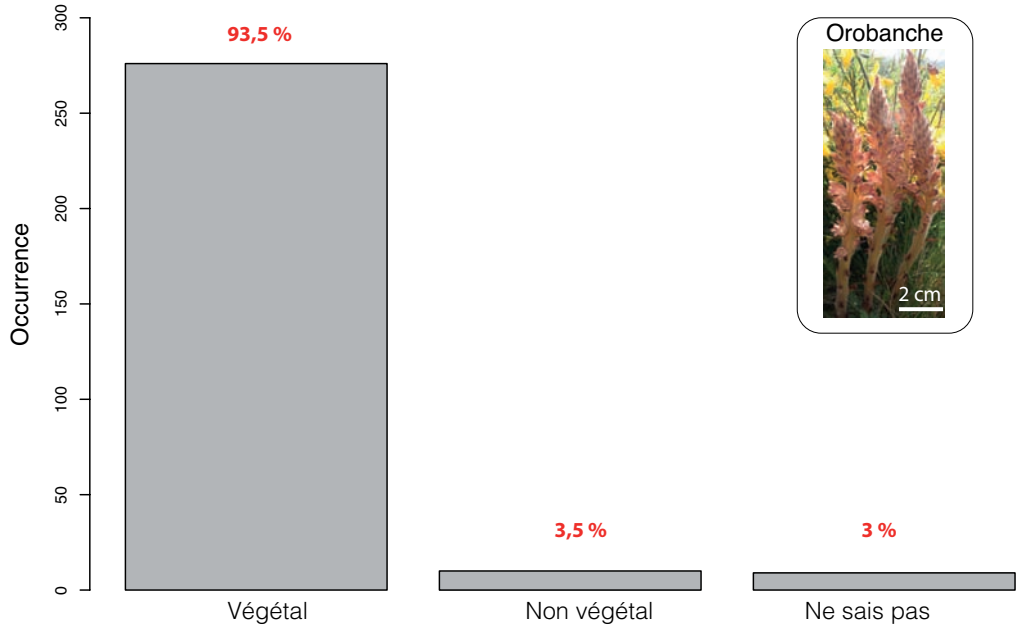


Figure 28 : graphique du nombre de réponses V, NV et NSP concernant l'orobanche

Pour les étudiants, peu nombreux (i.e. 28), ayant mobilisé une conception par opposition (CPO), une conception phylogénétique réduite (CPR) ou une conception macrocentrée définissant les végétaux comme les plantes terrestres (CFM2), il apparaît logique de considérer végétale l'orobanche.

Mais ce résultat nous interroge pour les autres conceptions fonctionnelles, au sens large, basées sur la photosynthèse, conceptions largement dominantes chez les étudiants : 170

étudiants, soit 57,6 %. Pour ces étudiants, il semble trop difficile de considérer une plante à fleur, même non chlorophyllienne, comme non végétale.

Nous souhaitons examiner précisément le raisonnement avancé par ces étudiants fonctionnalistes qui considèrent la photosynthèse comme un critère essentiel pour définir les végétaux jusqu'à rencontrer cette espèce.

Cette espèce est problématique. Elle met en tension les logiques associées aux classifications fonctionnelle et phylogénétique. En effet, sur le plan fonctionnel l'orobanche n'est pas photosynthétique. Selon une conception fonctionnelle, elle n'est pas végétale. Cependant, elle reste phylogénétiquement une plante à fleur malgré la perte secondaire de la chlorophylle. Les étudiants qui pensent que les végétaux sont monophylétiques peuvent appliquer, en toute logique, un raisonnement phylogénétique autorisant une perte secondaire au sein de la lignée. Mais ces derniers sont peu nombreux comme nous l'avons vu précédemment.

Nous souhaitons comprendre la nature du raisonnement mis en œuvre par les étudiants fonctionnalistes répondant que l'orobanche est végétale et que les végétaux ne sont pas monophylétiques, et qu'ils restent majoritaires.

Prenons cet exemple nous semblant représentatif : celui de l'étudiant 75. Celui-ci considère l'orobanche comme végétale, argumentant « *la perte secondaire de la photosynthèse car les Angiospermes sont des végétaux* ». Il utilise un raisonnement évolutif propre à une classification phylogénétique, celui de la perte secondaire au sein du groupe des Angiospermes qui appartiendraient aux végétaux, un raisonnement par inclusion. Pourtant les questions 1 et 2 montrent que cet étudiant a une conception clairement fonctionnelle : exclusion de l'amanite et de la souris, toutes deux non photosynthétiques. Par ailleurs, la réponse à la question 4 montre un bon niveau de connaissances phylogénétiques.

> « Le groupe des végétaux est un groupe polyphylétique : la photosynthèse est apparue à plusieurs reprises au cours des temps d'après la théorie de l'endosymbiose, ce qui explique la variation du nombre de membranes autour des plastes notamment. Il n'existe pas un ancêtre commun exclusif au groupe des végétaux ».

Considérer l'orobanche comme végétale peut être interprété comme un problème d'articulation des raisonnements fonctionnel et phylogénétique, une dissonance entre deux logiques explicatives distinctes. La perte d'une fonction entraînant la sortie du groupe fonctionnel, cet étudiant fonctionnaliste devrait, en toute logique, exclure l'orobanche des végétaux, alors qu'il bascule sur un raisonnement phylogénétique.

De manière à analyser de manière quantitative les arguments utilisés par ces étudiants pour justifier que l'orobanche est végétale, nous calculons l'occurrence des différents arguments.

Les réponses les plus fréquentes sont consignées dans le tableau 18, par ordre d'importance quantitative.

	Plaste	**Paroi**	**Eucaryote**	**Inclusion**	**Paroi pecto-cellulosique**	**Perte secondaire**
Nombre	131	78	69	68	59	38
%	47,5	28,3	25	24,6	21,4	13,8

Tableau 18 : arguments les plus fréquents avancés pour justifier que l'orobanche est végétale. % calculé sur l'effectif de 276 étudiants répondant Orobanche = V

Le caractère le plus cité est la présence de plastes, bien que non chlorophylliens, puis d'autres caractères cellulaires comme la présence d'une paroi, voire même d'une paroi pecto-cellulosique et la nature eucaryote de cet organisme. Ainsi, face à l'impossibilité de maintenir un raisonnement fonctionnaliste pour l'orobanche qui devrait les conduire à la considérer comme non végétale, un grand nombre d'étudiants développant une conception fonctionnelle des végétaux (s.l.) change alors de mode de raisonnement. Ils mobilisent une conception strictement cellulaire des végétaux. Cette dernière revient à définir un végétal comme « un organisme ayant des cellules eucaryotes avec des plastes », ce qui leur permet de maintenir l'orobanche parmi les végétaux.

Cette bascule vers une conception cellulaire est-elle rencontrée pour les quatre conceptions fonctionnelles ? À la vue des résultats de l'analyse non supervisée et des différences importantes de définition des végétaux dans ces deux cas, nous choisissons de distinguer les deux conceptions fonctionnelles macrocentrées. La figure 29 compare le pourcentage d'étudiants dans cette situation, pour chacune des conceptions fonctionnelles, et le pourcentage de recours au terme « plaste » permettant de justifier la réponse.

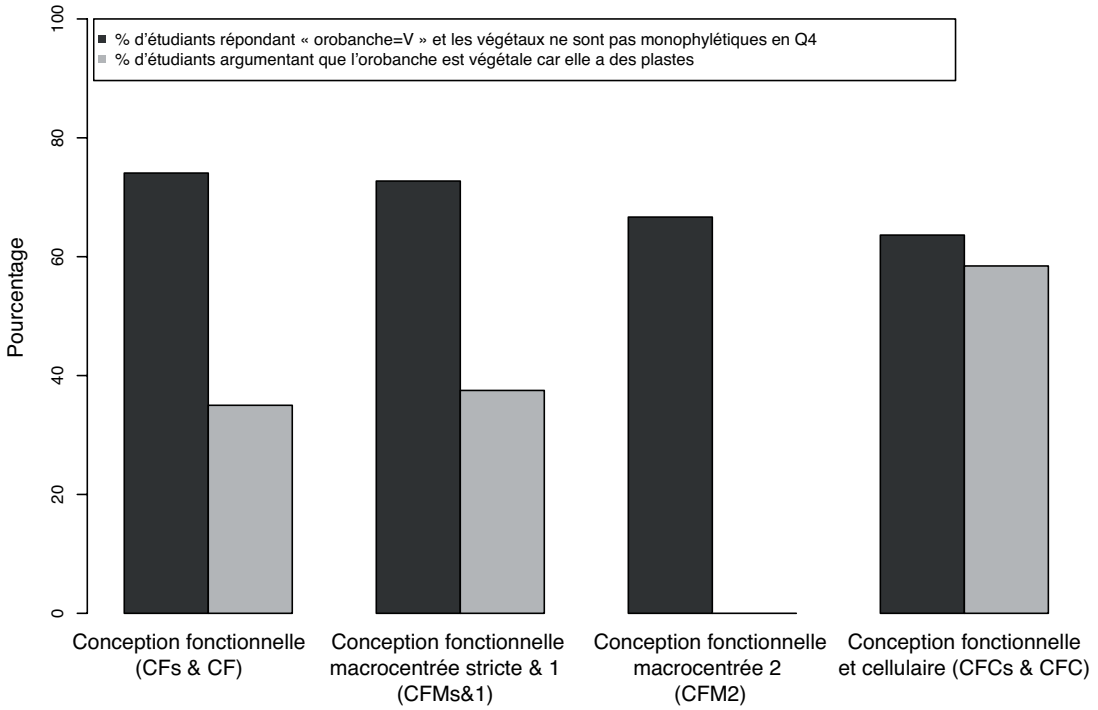


Figure 29 : comparaison du pourcentage d'étudiants répondant que l'orobanche est végétale et que les végétaux ne sont pas monophylétiques (Q4) pour chaque conception fonctionnelle.

Nous observons que le nombre d'étudiants qui classent l'orobanche parmi les végétaux, tout en sachant que les végétaux ne sont pas monophylétiques, se répartit de façon équiprobable entre les quatre types de conceptions fonctionnelles. Le comportement de réponse face à l'orobanche ne diffère pas selon la conception, dès lors qu'elle est fonctionnaliste (p-value du Chi2 d'homogénéité = 0,91 > 0,05).

La figure 29 montre un comportement différent des étudiants CFM2. En effet, aucun d'eux ne cite la présence de plaste pour justifier leur réponse. Ils n'utilisent pas une conception cellulaire mais argumentent de façon anatomique : présence d'une tige feuillée. Ce résultat confirme la différence de logique entre les deux conceptions : CFM1 et CFM2, qu'il faut clairement distinguer dans cette situation problématique.

En conclusion, cette analyse révèle la nécessité d'envisager une septième conception émergente des végétaux, la conception cellulaire : CC. Elle est utilisée dans la situation de classification de l'orobanche, lorsque le raisonnement convoqué jusque-là montre ses limites pour expliquer que l'orobanche est un végétal. Cela montre à nouveau la dépendance des conceptions à la situation que celle-ci permet de résoudre. Elle corrobore l'idée, avancée dans la première section de positionnement théorique, qu'une conception n'est pas un déjà-là constitué que les étudiants appliqueraient en un bloc, mais est une actualisation d'outils

intellectuellement disponibles que les étudiants restent en mesure de mobiliser dans certaines situations.

Cette étude a également montré l'existence d'une dissonance entre deux logiques explicatives distinctes : celle de la classification fonctionnelle ne tolérant par la perte de fonction, et celle de la classification phylogénétique dans laquelle un état de caractère peut évoluer et disparaître au sein de la lignée.

4.2.3. Étude des obstacles mis en jeu (QR2c)

Une autre interprétation hypothétique peut être avancée comme explication de cette dissonance. Il est possible que certains étudiants mobilisent une pensée essentialiste et opèrent une réification des groupes systématiques, considérant que les organismes « sont intrinsèquement porteurs d'une essence idéelle qui les transcende » (Lecointre, 2009b, p. 24). L'essentialisme pourrait se constituer en obstacle épistémologique. L'argument « car les Angiospermes sont des végétaux » pourrait-être la trace du recours aux végétaux en tant que groupe réifié, dont l'existence ne serait alors pas questionnée dans le contexte spécifique de l'orobanche. Un recueil de données complémentaires permettrait d'explorer davantage le recours à une pensée essentialiste, ce que nous avions envisagé dans le cas, particulier, de la souris.

Pour d'autres étudiants, une telle dissonance pourrait être interprétée comme un recours mal contrôlé aux connaissances et aux méthodes de la classification phylogénétique pour conduire leur raisonnement. Les groupes de rang « supérieur » : végétaux, animaux, etc., seraient alors mobilisés comme des arguments d'autorité.

5. Conclusion de l'enquête didactique

Le tableau 19 ci-après récapitule les résultats majeurs ainsi que les limites de notre étude pour chaque question de recherche.

QR1 : étude des conceptions des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification, analyse de leurs modes de fonctionnement et de leurs origines possibles
QR1a : Identification des conceptions des végétaux en tant que groupe biologique dans une situation de classification pour laquelle le registre explicatif n'est pas imposé. Quelles espèces les étudiants classent-ils parmi les végétaux et pour quelles raisons ? Quelles sont les caractéristiques utilisées par les étudiants pour définir le groupe des végétaux ? Quels problèmes fondent leurs classifications ?
- Cinq conceptions des végétaux comme groupe classificatoire ont été définies grâce à une analyse *a priori* basée sur une enquête exploratoire (2014). Ces conceptions se distinguent par la nature des problèmes auxquelles elles répondent : fonctionnel, structural à l'échelle cellulaire ou de l'organisme, phylogénétique, ainsi que nature des raisonnements mis en jeu (cf. tableau 5, p. 95). - L'analyse supervisée montre une répartition très inégale des conceptions. La conception fonctionnelle et cellulaire (CFC) est la plus fréquente avec 121 étudiants : 36,3 % des 333 étudiants interrogés. Les conceptions fonctionnelle macrocentrée (CFM) et fonctionnelle (CF) concernent chacune près de 10 % des étudiants, respectivement 31 étudiants (9,3 %) et 27 étudiants (8,1 %). Enfin, figurent les conceptions par opposition (CPO) et phylogénétique réduite (CPR) avec seulement 3,3 % et 2,4 % des étudiants. 97 étudiants, soit 29,1 %, n'entrent dans aucune des cinq conceptions et sont catégorisés dans la catégorie par défaut « Autre ». - Une analyse statistique non supervisée a été réalisée sur les réponses aux douze premières espèces de la seconde question. Elle permet de retrouver plusieurs des cinq conceptions définies par l'analyse *a priori*. En effet, les étudiants des conceptions : CF, CPR, CFM1, CPO, sont regroupés dans la classification hiérarchique et par l'analyse des correspondances multiples (ACM). La conception fonctionnelle et cellulaire (CFC), largement dominante, apparaît comme n'étant pas homogène car plusieurs sous-groupes s'individualisent. Ils se distinguent notamment par la précision des caractères cellulaires requis (présence d'une paroi et nature biochimique). La conception CFM2, limitant les végétaux aux plantes terrestres, est disjointe de la CFM1 incluant les macro-algues dans les deux analyses non supervisées. Aussi, nous proposons de distinguer six conceptions plutôt que cinq. La catégorie par défaut « Autre » ne semble pas correspondre à une nouvelle conception émergente non identifiée par l'analyse *a priori* au vu de l'analyse non supervisée. Deux cas de figure nous paraissent expliquer la catégorie « Autre ». La première est liée à notre méthodologie d'identification des conceptions. Le protocole de l'analyse supervisée est relativement contraignant dans le but de ne pas identifier à tort un étudiant qui n'aurait pas mobilisé une conception donnée. Par conséquent, le

protocole présente un biais qui conduit à augmenter l'effectif de la catégorie « Autre » en y assignant des étudiants n'ayant pas explicité certaines caractéristiques en question 1 mais les ayant pourtant utilisé en question 2, pour une ou certaines espèces. Il nous semble que la seule façon de procéder serait d'étudier, une à une, la logique de réponse de chacun des 97 étudiants « Autre », pour reconnaître les étudiants que notre protocole a manqué et s'assurer, ainsi, de l'exactitude des chiffres avancés par conception.

Le second cas de figure correspond aux étudiants qui ont recours à une conception des végétaux possédant un domaine de validité réduit. Certains étudiants changent de logique argumentative face à une nouvelle espèce qui pose un problème non envisagé initialement. Ainsi l'étude de la première question combinée aux douze premières espèces de la seconde question est une situation trop vaste pour certains étudiants, dont la conception mobilisée initialement possède un domaine de validité réduit. Seule une étude, au cas par cas, des étudiants assignés dans la catégorie par défaut « Autre » permettrait d'identifier les changements de logique et de mieux délimiter le domaine de validité d'une conception donnée pour chacun de ces étudiants et, également, de caractériser le type d'espèce qui leur pose problème.

QR1b : Est-ce que certains étudiants explicitent la tension relative à la polysémie du concept de végétal, entre pensées fonctionnaliste et phylogénétique ?

11 étudiants indiquent spontanément l'existence de plusieurs définitions dans la première question ouverte, soit 3,3 % des 333 étudiants interrogés. Il s'agit donc d'une très faible proportion de ceux-ci. Elle est à mettre en regard du fait qu'aucune question ne les conduisait explicitement à formuler cette tension. Notons que 3 étudiants, parmi les 38 catégorisés initialement comme « indécis », manifestent un recul important sur le concept de végétal, qui explique le fait qu'ils ne se prononcent pas pour plusieurs espèces.

QR1c : Confrontés à des Eucaryotes unicellulaires qui ont posé problème au cours de l'histoire de la classification, comment les étudiants réagissent-ils pour classer ces espèces vis-à-vis des végétaux ? Rencontrent-ils des difficultés particulières pour ces espèces ?

Trois indicateurs permettent d'avancer l'idée que des étudiants éprouvent des difficultés à classer les organismes eucaryotes unicellulaires au sein ou à l'extérieur du groupe des végétaux. Le nombre de réponses « ne sais pas » (NSP) pour *Euglena* et *Surirella* est statistiquement plus élevé que pour les autres espèces. De plus, le nombre d'arguments d'emboîtement (inclusion/exclusion) est quant à lui statistiquement plus faible. Enfin, plusieurs étudiants avancent, comme seul argument pour classer ces deux espèces, qu'elles sont végétales car étudiées en biologie végétale. Cette justification non scientifique n'est jamais avancée pour d'autres espèces comme les plantes terrestres.

Ces différences témoignent du potentiel didactique que présentent ces espèces pour travailler en formation la diversité des classifications et la polysémie du concept de végétal.

QR1d : Les réponses des étudiants font-elles recours à des modes de raisonnement susceptibles

d'exercer la fonction d'obstacle dans certaines situations ?

• La conception fonctionnelle et cellulaire s'attache à définir les végétaux en rapport avec l'existence d'un type particulier d'organisation cellulaire. Cette pensée prototypique se référant à « la » cellule végétale pourrait résulter - au moins en partie - des enseignements universitaires et de manuels de biologie distinguant la cellule animale et la cellule végétale. Ce mode de raisonnement pourrait constituer un obstacle didactique pour penser la diversité des végétaux à l'échelle cellulaire.

• Le macrocentrisme consiste à se focaliser sur les macro-organismes pluricellulaires et exclure les micro-organismes. Le recours à ce mode de raisonnement change avec les questions. Lors de la première question ouverte, certains étudiants mobilisèrent un macrocentrisme très marqué, limitant les végétaux aux seules plantes à fleurs puis, face à d'autres espèces, ont élargi le groupe des végétaux en incluant l'ensemble des plantes terrestres (CFM2) ou les macro-algues (CFM1). Ce résultat illustre l'importance de la prise en compte de la situation de production dans l'inférence des conceptions, situation qui détermine la nature du problème. Sur le plan méthodologique, il est donc important de croiser les réponses aux différentes questions pour inférer la conception des étudiants, par nature située et de ne pas se limiter à une seule question définitoire.

• La pensée catégorielle, opposant animaux et végétaux comme deux catégories exclusives, fonde la conception par opposition. Elle rappelle la vision binaire du monde vivant consacrée par Linné, au XVIII^{e} siècle. Mais l'étude de l'argumentation des étudiants montre que ce mode de raisonnement catégoriel se distingue de son usage historique car les étudiants, en majorité, incluent les champignons parmi les végétaux sur des fondements cellulaires, la présence d'une paroi.

• L'étude des justifications fournies montre le recours à l'idée d'une hiérarchie du vivant par 12 étudiants, ce jugement de valeur étant hérité d'une vision scaliste du vivant. Nous discuterons du recours à cette pensée dans le cadre de l'étude historique des classifications.

• L'obstacle du « primat de la perception » joue dans les réponses concernant les algues rouges et brunes que des étudiants ne considèrent pas végétales en raison de leur couleur non verte, interprétée comme une absence de chlorophylle. De façon probablement corrélée, plusieurs d'entre-eux manifestent une incompréhension de l'expression « lignée verte », comme l'indique l'exclusion des algues rouges de ce groupe alors qu'elles en font pourtant partie. Cette incompréhension pourrait aussi provenir d'une difficulté verbale liée à l'usage du terme « vert ». Ce résultat nous conduit à suggérer de remplacer l'expression « lignée verte » par celui d'Archaeplastida, ne présentant pas cette ambiguïté.

• Le cloisonnement disciplinaire distinguant biologie animale et végétale a été utilisé par 5 étudiants comme argument pour inclure une espèce parmi les végétaux. L'existence de disciplines identifiées dans l'enseignement peut constituer une aide pour les apprenants et clarifier ce qui relève ou non de leur champ d'étude. Mais il peut aussi constituer un obstacle si il conduit à stopper le questionnement sur les raisons de la végétalité d'une espèce donnée.

• Des réponses relatives à la souris, empreintes d'ironie, pourraient être interprétées par le recours à une pensée essentialiste conduisant à réifier des groupes systématiques dont l'existence ne serait pas questionnée, alors même que d'un point de vue épistémologique, les groupes sont des constructions humaines. Cette hypothèse en appelle à un recueil de données complémentaires afin de mieux comprendre le raisonnement de ces étudiants. Le questionnaire montre, ici, sa limite alors que des entretiens individuels sembleraient plus adaptés pour explorer l'éventuelle mise en jeu d'une pensée essentialiste.

Nous questionnerons la nature épistémologique de ces différents obstacles par une étude historique dans le prochain chapitre.

QR2 : étude des logiques de réponses en fonction des situations et de leur articulation entre classification fonctionnelle et phylogénétique

QR2a : Quelles sont les relations entre les réponses des étudiants et les différentes situations de classification :

- question ouverte, mais avec des espèces variées présentant des caractéristiques différentes et susceptibles d'entraîner des changements de réponses,
- puis question résolument fonctionnelle à l'échelle écosystémique : problème écologique,
- et, enfin, une question engageant un problème phylogénétique ?

Autrement dit, comment évolue la logique de leurs réponses en fonction des situations ?

• L'étude de la question 3 révèle que les étudiants possèdent des connaissances écologiques sur l'importance des végétaux, au sens fonctionnel, dans les écosystèmes. Les deux réponses les plus communes, arrivant très largement devant les autres arguments, sont : les végétaux constituent le premier niveau des chaînes alimentaires et des réseaux trophiques (220 étudiants), et les végétaux sont des producteurs primaires (180 étudiants). Cependant, la comparaison avec les réponses de ceux-ci dans la situation ouverte de classification montre une différence majeure. 224, soit 76 % des 295 étudiants « non indécis », n'avancent pas d'arguments du registre écologique en question 1, alors qu'ils manifestent des connaissances écologiques en question 3. Les étudiants ne définissent pas, spontanément, les végétaux à l'échelle écosystémique, mais à celle de l'organisme. En première approche, ils raisonnent sur les végétaux en tant qu'individus (niveau objectal) et, quand cela ne semble pas suffisant, ils envisagent d'autres types de relations entre espèces et avec le milieu de vie (niveau inter-objectal).

• L'étude de la question 4 montre que la grande majorité des étudiants (208, soit 70,5 % des 295 « non indécis ») répond que les végétaux ne constituent pas un groupe monophylétique. Autrement dit, que les végétaux ne forment pas un groupe valide dans la classification phylogénétique actuelle. La réponse à la question 4 sur la monophylie des végétaux serait statistiquement dépendante du traitement d'un problème phylogénétique pour définir le concept de végétal. Les étudiants mobilisant une conception phylogénétique réduite répondent, en effet, que les végétaux sont monophylétiques de façon dominante, contrairement aux étudiants mobilisant les autres conceptions.

Par ailleurs, certaines réponses indiquent que la formulation de la question 4 offre plusieurs

interprétations possibles et qu'elle mériterait d'être clarifiée si le questionnaire devait être modifié pour une nouvelle enquête. Bien que peu nombreux, les étudiants qui envisagent une multiplicité de définitions des végétaux ont compris la question comme : « les végétaux au sens large forment-ils un groupe monophylétique » et non « les végétaux tels que vous les avez défini à travers vos réponses précédentes ».
QR2b : comment les étudiants gèrent-ils la dualité des logiques des classifications fonctionnelle et phylogénétique au regard d'une espèce problématique, une plante à fleur parasite non chlorophyllienne : orobanche ?
La quasi-totalité des étudiants (276, soit 93,5 %), considère que l'orobanche est végétale. Cette réponse est cohérente avec la conception par opposition, la conception phylogénétique réduite et celle fonctionnelle macrocentrée 2 qui définit les végétaux comme les plantes terrestres. Mais elle nous paraît dissonante avec les trois autres conceptions fonctionnelles impliquant la photosynthèse (170 étudiants, soit 57,6 %) et le fait de considérer les végétaux comme un groupe non monophylétique, qui, en toute logique, devrait interdire de suivre une logique phylogénétique autorisant la perte d'un caractère dans une lignée. Ce résultat majeur nous semble traduire une difficulté extrême à considérer l'orobanche, plante à fleur, comme non végétale. Cette espèce est problématique puisqu'elle met en tension les logiques associées aux classifications fonctionnelle et phylogénétique. Pour nombre d'étudiants, nous assistons à un recours mal contrôlé aux principes de la classification phylogénétique pour conduire un raisonnement concernant un groupe fonctionnel qui ne relève pas de la même logique classificatoire. À l'exception des étudiants CFM2, les étudiants fonctionnalistes se rabattent sur une conception purement cellulaire des végétaux : cellules avec des plastes, considérant alors la photosynthèse comme un caractère non nécessaire. Cette étude révèle une septième conception des végétaux : la conception cellulaire (CC) qui devient majeure dans la situation de classification d'une plante à fleur dépourvue de chlorophylle. Là encore, nous constatons l'importance de la situation de production dans laquelle un changement de logique de réponse s'opère pour un nombre très important d'étudiants. La différence d'argumentation des étudiants CFM1 et CFM2 (plantes terrestres), où seuls les premiers adoptent une conception cellulaire alors que les seconds avancent un argument anatomique : la présence d'une tige feuillée, justifie de distinguer plus clairement ces deux conceptions.
QR2c : L'articulation de différents types de classification révèle-t-elle la mobilisation d'autres obstacles que ceux identifiés précédemment ?
Une autre interprétation hypothétique peut être avancée pour expliquer cette dissonance. Elle pourrait être la trace d'une pensée essentialiste conduisant à une réification du groupe des végétaux, dont l'existence ne serait alors pas questionnée dans le contexte spécifique d'une espèce problématique, comme l'orobanche. Un recueil de données complémentaires permettrait d'explorer davantage le recours à une pensée essentialiste, que nous avions envisagé également dans le cas particulier de la souris.

Tableau 19 : synthèse des principaux résultats pour chaque question de recherche

Chapitre 3 : étude historique de la nature du groupe des végétaux dans la systématique du vivant

1. REFORMULATION DES QUESTIONS DE RECHERCHE À LA LUEUR DES RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE DIDACTIQUE 159

1.1. Bilan de l'enquête didactique, source de questions posées à la sphère historique 159
1.1.1. Des difficultés à classer les espèces d'Eucaryotes unicellulaires 159
1.1.2. Mobilisation de conceptions présentant des similitudes avec les classifications à deux et cinq règnes 159
1.1.3. Des difficultés à associer un type de classification (fonctionnel ou phylogénétique) avec son mode de raisonnement spécifique 160
1.1.4. Des conceptions pouvant faire obstacle 161

1.2. Nouvelle formulation des questions de recherche 162

2. LES CHANGEMENTS TAXONOMIQUES SUCCESSIFS ET LEURS CONSÉQUENCES SUR LA NATURE DU GROUPE DES VÉGÉTAUX 163

2.1. Le problème de la place des unicellulaires dans la classification : la fin du système à deux règnes du vivant 163
2.1.1. Le problème de la place des organismes aux caractéristiques mixtes 163
2.1.2. Un troisième règne du vivant 164
2.1.3. Un nouveau contexte systématique : le développement de la « nouvelle systématique » ou « systématique évolutionniste » 182
2.1.4. Le problème de la place des bactéries : un quatrième règne du vivant 183

2.2. Le problème de l'importance accordée aux modes de nutrition : un cinquième règne du vivant 190
2.2.1. La genèse de la classification de Whittaker en 1957 190
2.2.2. La classification à quatre règnes en 1959 193
2.2.3. La classification à cinq règnes en 1969 195
2.2.4. Les modifications du système à cinq règnes par Margulis et Whittaker 201
2.2.5. Le problème de la recherche de groupes monophylétiques : la fin d'un unique règne végétal 204
2.2.6. Le renouveau de la systématique par la remise en cause de la systématique évolutionniste 204
2.2.7. La classification de Cavalier-Smith et l'éclatement du règne végétal 206
2.2.8. Le problème de la recherche de groupes strictement monophylétiques : les clades 221

2.3. Conclusion relative à l'évolution du groupe des végétaux dans la systématique du vivant 232
2.3.1. Tableau synoptique 232

2.3.2. Évolution du terme Plantae 237

3. LES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES ET LEUR INFLUENCE DANS LA SYSTÉMATIQUE 239

3.1. La pensée catégorielle 239

3.2. Le macrocentrisme 241

3.3. Le gradisme 242
3.3.1. Le gradisme chez Haeckel 243
3.3.2. Le gradisme chez Copeland 245
3.3.3. Le gradisme chez Whittaker 246
3.3.4. Le gradisme chez Cavalier-Smith 246

3.4. L'essentialisme 247
3.4.1. Nominalisme vs essentialisme 248
3.4.2. Éclairage historique du débat sur la nature philosophique des taxons 250
3.4.3. Conception prototypique cellulaire 258
3.4.4. Conclusion relative aux obstacles épistémologiques et leur influence 259

4. CONCLUSION DE L'ÉTUDE HISTORIQUE 261

Cette étude historique porte sur la place et la nature du groupe des végétaux dans la systématique du vivant. L'analyse se focalisera sur les modifications taxonomiques majeures qui ont pesé sur l'évolution du groupe des végétaux du XIX^{e} siècle à nos jours ainsi que sur la nature des obstacles ayant joué sur les classifications.

Sachant qu'il existe un « programme » didactique de l'étude historique, nous entendons tout d'abord mettre en relief certains résultats de l'enquête didactique afin de préciser et reformuler les questions de recherches historiques.

Dans un deuxième temps, nous étudierons les changements taxonomiques successifs et leurs conséquences sur la nature du groupe des végétaux. L'accent sera mis sur les problèmes auxquels les classifications ont cherché à répondre : l'importance des relations évolutives ; la place des unicellulaires puis, plus particulièrement, la place des bactéries dans la classification ; l'importance accordée aux modes de nutrition en tant que direction évolutive ; enfin, l'importance de groupes monophylétiques. Nous conclurons cette section par un tableau synoptique récapitulant les principaux systèmes classificatoires étudiés et la nature des végétaux dans chacun d'eux, ainsi qu'une discussion sur l'évolution historique du terme Plantae.

Dans un troisième et dernier temps, nous reviendrons sur les cinq modes de raisonnement identifiés dans l'enquête didactique pouvant faire obstacle, ce qui permettra d'identifier quels

sont ceux de nature épistémologique et de comprendre comment ils ont pu peser dans l'histoire des classifications et la délimitation du groupe des végétaux.

Rappelons que cette étude historique devrait permettre d'élaborer une reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques, donnant ainsi l'occasion de travailler les difficultés conceptuelles recensées dans l'enquête didactique précédente.

1. Reformulation des questions de recherche à la lueur des résultats de l'enquête didactique

1.1. Bilan de l'enquête didactique, source de questions posées à la sphère historique

1.1.1. Des difficultés à classer les espèces d'Eucaryotes unicellulaires

L'étude des réponses concernant les deux espèces d'Eucaryotes unicellulaires du questionnaire (*Euglena* et *Surirella*) nous a montré qu'un certain nombre d'étudiants éprouve des difficultés à classer ces espèces (cf. p. 129). Nous avons en effet constaté un nombre plus élevé de réponses « Je ne sais pas si cette espèce est végétale » et un nombre plus faible d'arguments d'emboîtement (inclusion/exclusion) que pour les autres espèces d'Eucaryotes. Ces différences, statistiquement significatives, peuvent être interprétées comme le résultat d'une difficulté à classer ces organismes Eucaryotes au sein ou à l'extérieur du groupe des végétaux. Il faut toutefois en relativiser l'importance quantitative puisqu'elle ne concerne que 9 % des 295 étudiants « non indécis ».

Le constat de cette difficulté nous conduit à questionner les façons dont les organismes unicellulaires ont été pris en compte dans l'arbre du vivant et ses conséquences sur la nature du groupe des végétaux et sa propre délimitation. Comment ont été classées les espèces unicellulaires dans les différents systèmes classificatoires ? Quelles furent les raisons des changements taxonomiques les concernant ? Enfin sur un plan historique, ces espèces peuvent-elles constituer un « fil rouge » pertinent pour suivre les modifications taxonomiques majeures ?

1.1.2. Mobilisation de conceptions présentant des similitudes avec les classifications à deux et cinq règnes

Parmi les différentes conceptions recensées lors de l'enquête nationale, deux d'entre-elles présentent des similitudes avec les classifications à deux et cinq règnes.

Il s'agit de la conception par opposition, mobilisée par 10 étudiants (soit 3 %), que l'on a identifié par l'inclusion des champignons parmi les végétaux. Elle pourrait rappeler, en

première approche, la traditionnelle vision binaire du monde vivant distinguant les animaux des végétaux dans le système à deux règnes. Mais l'étude argumentative a révélé que la justification de ce regroupement est fondée principalement sur l'existence d'une paroi, c'est-à-dire sur des bases cellulaires plus récentes que la conception duale du vivant.

Il s'agit également de la conception fonctionnelle macrocentrée incluant les macroalgues et excluant les algues unicellulaires (CFMs et CFM1), mobilisée par 22 étudiants (soit 7 %). Elle évoque la conception des végétaux, développée historiquement par Whittaker (1969) dans son système à cinq règnes. Cet auteur a distingué le groupe Plantae (Eucaryotes pluricellulaires photosynthétiques) du groupe Fungi (Eucaryotes pluricellulaires absorbotrophes). Il consacra ainsi la séparation des champignons du règne végétal, constituant une révision taxonomique majeure.

Bien que minoritaires, la mobilisation de ces deux conceptions présentant certaines similitudes avec des étapes de l'évolution taxonomique nous amène à questionner les raisons historiques de ces changements. Quel problème conduisit les systématiciens à remettre en cause la classification à deux règnes ? Quel problème amena Whittaker à séparer les végétaux des champignons et comment expliquer la remise en cause de ce système à cinq règnes ?

1.1.3. Des difficultés à associer un type de classification (fonctionnel ou phylogénétique) avec son mode de raisonnement spécifique

Le cas de l'orobanche, une plante à fleurs non chlorophyllienne, permit d'identifier la difficulté d'associer un type de classification (fonctionnelle ou phylogénétique) et le mode de raisonnement qui lui est spécifique chez de nombreux étudiants. En effet, dans le cadre d'une classification phylogénétique, la perte d'un caractère peut avoir lieu au sein d'un groupe donné et n'entraîne pas la sortie du groupe correspondant. Il n'en est pas de même pour une classification fonctionnelle. Or, les étudiants répondent dans leur quasi-totalité (276, soit 93,5 %) qu'une orobanche est végétale alors même que 61 % d'entre eux mobilisent une conception fonctionnelle (s.l.) basée sur la photosynthèse. Confrontés à la dernière question explicitement phylogénétique, la grande majorité des étudiants (70,5 %) a connaissance de la non validité du groupe des végétaux dans la classification phylogénétique actuelle. La perte secondaire est invoquée pour justifier que l'orobanche est végétale par 28 étudiants fonctionnalistes ayant répondu que les végétaux ne sont pas monophylétiques (soit 24 % des 119 étudiants concernés fonctionnalistes ayant répondu que l'orobanche est végétale et que les végétaux ne sont pas monophylétiques). Cette justification par perte secondaire montre une dissonance entre les logiques spécifiques des deux types de classification. Face à cette

situation problématique, d'autres, plus nombreux encore, argumentent que l'orobanche est végétale car ses cellules possèdent des plastes (58 étudiants, soit 49 % des 119 étudiants concernés). Ils basculent alors d'une conception fonctionnaliste (s.l.) basée sur la photosynthèse vers une conception strictement cellulaire dans laquelle les végétaux sont des organismes possédant des cellules avec des plastes, qu'ils soient ou non photosynthétiques. Leur conception perd sa logique fonctionnelle sans pour autant avoir de fondement phylogénétique, étant donné leur réponse à la question 4. Ces résultats peuvent être interprétés comme le résultat d'une difficulté à associer un type de classification avec son mode de raisonnement qui lui est spécifique.

Le constat de cette difficulté quantitativement importante nous conduit à questionner sur un plan historique comment la systématique a modifié ses principes et méthodes, en abandonnant des critères fonctionnels (comme les modes de nutrition), critères qui favorisent le regroupement des organismes au sein de grades partageant une même « zone adaptative » (Tassy, 2003) ? Quelles sont les conséquences de ces changements méthodologiques sur la nature du groupe des végétaux ainsi définis par Whittaker selon des critères éclectiques ?

1.1.4. Des conceptions pouvant faire obstacle

L'étude didactique nous a permis d'inférer cinq modes de raisonnement pouvant exercer la fonction d'obstacle (cf. p. 97), en rappelant « qu'une idée ou représentation n'est pas en elle-même un obstacle, c'est la dynamique dans laquelle elle s'insère qui l'est » (Peterfalvi, 2008, p. 111).

- La pensée catégorielle
- Le macrocentrisme
- La conception prototypique
- La conception gradiste
- La conception essentialiste

Gaston Bachelard et Georges Canguilhem, deux auteurs majeurs de l'épistémologie historique française, recherchent les obstacles épistémologiques dans l'histoire des sciences, sans pour autant s'y limiter, tentant de dégager des modes de fonctionnement de la pensée humaine.

> « Bachelard (1938) ainsi que Canguilhem (1962, 1968, 1988) s'intéressent aux obstacles épistémologiques dans l'évolution historique des idées, mais ne s'y cantonnent pas. C'est souvent dans des termes plus généraux, relatifs au fonctionnement général de la pensée

> scientifique qu'ils proposent leurs formulations des obstacles, dans une démarche interprétative. » (Peterfalvi, 2008, p. 110)

Les obstacles pouvant avoir différentes origines, quels sont ceux de nature épistémologique parmi les cinq, ci-dessus énoncés, que nous avons identifié d'après l'étude didactique ? De quelle façon ces modes de raisonnement ont-ils pesé dans les classifications et la délimitation du groupe des végétaux ?

1.2. Nouvelle formulation des questions de recherche

Les questions de recherche travaillées dans ce chapitre sont présentées dans le tableau 20. La première des deux grandes questions de recherche est subdivisée en plusieurs questions qui ont émergé de notre étude didactique.

• QR1. Quels sont les changements taxonomiques successifs ayant conduit à la rectification du groupe des végétaux du XIX^{e} siècle à nos jours et, plus particulièrement, quelle est la nature des problèmes auxquels les systématiciens se sont affrontés à l'occasion de la construction des systèmes classificatoires successifs ?
- QR1a. Comment furent classés les espèces unicellulaires dans les différents systèmes classificatoires et quelles sont les raisons des changements taxonomiques les concernant ? Cette question nous permet d'examiner le problème ayant conduit les systématiciens à remettre en cause la classification à deux règnes. Sur un plan historique, ces espèces peuvent-elles constituer un « fil rouge » pertinent pour suivre les modifications taxonomiques majeures affectant le groupe de végétaux ?
- QR1b. Quel problème amena Whittaker à séparer les végétaux des champignons ? Qu'est-ce qui fonde le système à cinq règnes ?
- QR1c. Comment la systématique a modifié ses principes et méthodes conduisant à abandonner le système à cinq règnes puis l'utilisation de grades ? Quelles sont les conséquences de ces changements méthodologiques sur la nature du groupe des végétaux dans l'arbre du vivant ? Le groupe Plantae existe aujourd'hui encore mais avec un contour différent, cette question devrait nous permettre de comprendre les raisons de ce changement.
• QR2. Quels sont les obstacles épistémologiques ayant pesé dans les classifications étudiées et la délimitation du groupe des végétaux ?

Tableau 20 : questions de recherche de l'étude historique

2. Les changements taxonomiques successifs et leurs conséquences sur la nature du groupe des végétaux

2.1. Le problème de la place des unicellulaires dans la classification : la fin du système à deux règnes du vivant

2.1.1. Le problème de la place des organismes aux caractéristiques mixtes

Dès l'Antiquité, les végétaux ont été décrits comme immobiles et insensibles par rapport aux animaux animés et sensibles. Cette conception dichotomique du monde vivant traversa les siècles et fut consacrée, en 1735, par Linné (1707-1778) dans sa classification qui présentait trois règnes de la nature dont deux règnes du vivant.

> « *Lapides* crescunt. *Vegetabilia* crescunt et vivunt. *Animalia* crescunt, vivunt et sentiunt. Hinc limites inter haecca Regna Constituta sunt. » (Linné, 1735)
>
> Traduction : « Les *Pierres* croissent, les *Végétaux* croissent et vivent. Les *Animaux* croissent, vivent et sentent. Telles sont les frontières entre lesquelles ces règnes sont établis[37]. »

Mais certains organismes restaient difficiles à classer dans ces deux règnes du vivant, comme les éponges, les anémones de mer ou encore les coraux. Au XVII^e^ siècle, Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723), considéré comme inventeur du microscope, observe des animalcules ou « petits animaux », décrits en 1676. Lorsqu'il se trouvait confronté à des organismes mobiles mais pigmentés (chlorophylliens), la mobilité prenait le pas sur la pigmentation[38]. Il en a été de même à l'occasion de la première description de l'euglène (*Euglena viridis*) par John Harris en 1696 qui l'a assigné parmi les animaux car mobile. Dans son ouvrage *Systema Naturae* (1735), Linné a regroupé ces micro-organismes avec les Zoophyta (étymologiquement animaux-plantes), au sein de la classe Vermes du règne animal. Notons que le terme zoophyte avait déjà été utilisé par Andreas Cesalpino (1583) pour désigner les êtres vivants ressemblants à la fois aux animaux et aux végétaux, attestant que la problématique des organismes mi-animaux, mi-végétaux n'est pas récente[39].

En France, Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), intendant du Jardin du Roi, est partisan d'une vision continuiste du vivant. L'existence d'organismes zoophytes, ayant des caractéristiques animales et végétales, est, pour cet illustre savant, la preuve de la continuité entre animaux et végétaux.

Afin de nommer les organismes microscopiques, un nouveau terme - celui d'Infusoires - fut proposé au début des années 1760 par Otto-Frédéric Müller. Les Infusoires regroupaient des

[37] Traduction proposée par Jean Gayon (Journées d'agrégation École Normale Supérieure et Université Paris 4-Sorbonne, le 3 décembre 2011 « L'animal : matériaux pour une réflexion philosophique »).

[38] Rothschild (1989, p. 278)

[39] Sapp (2009, p. 8)

organismes microscopiques très divers. Dans sa 12e édition de *Systema Naturae* (1766-1768), Linné regroupa tous les unicellulaires dans une seule *espèce Chaos infusorium* au sein du groupe Vermes dans le règne animal[40].

2.1.2. Un troisième règne du vivant

- **Le règne des Psychodiaires (Bory de Saint Vincent, 1824)**

En 1824, Jean-Baptiste Bory de Saint Vincent (1778-1846) propose un troisième règne du vivant : les Psychodiaires. Il mobilise une conception continuiste du vivant, à la suite de Buffon, illustrée par la métaphore des bandes d'arc-en-ciel.

> « Ces Zoophytes ont jeté la confusion sur les confins de deux empires et mis à la torture l'esprit des naturalistes, qui attachent beaucoup d'importance à distinguer le végétal de l'animal ; distinction aussi vaine, aussi plus nécessaire à connoître, que celle qu'on supposeroit exister entre deux bandes des couleurs de l'arc-en-ciel » (Bory de Saint Vincent, 1824, p. 658)

Dans sa classification, il caractérise ainsi les Psychodiaires (cf. figure 30) : « où chaque individu apathique se développe et croit à la manière des minéraux et des végétaux, jusqu'à l'instant où des propagules animés répandent l'espèce dans des sites d'élection. (Les Arthrodiées, les Spongiaires, la plupart des Polypiers) » (Ibid., p. 659).

[40] Sapp (2009, p. 8)

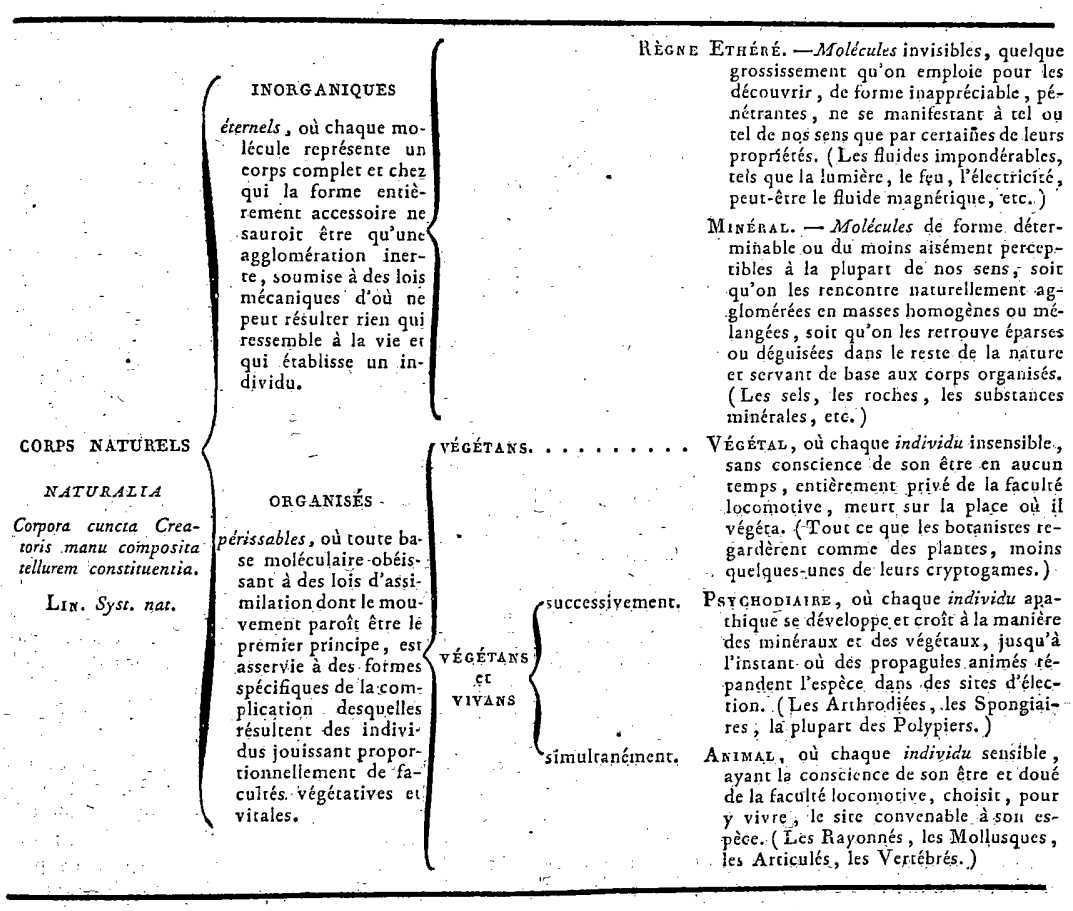


Figure 30 : classification de Bory de Saint Vincent, reproduit de Ibid., p. 659

Pour Bory de Saint Vincent, les Psychodiaires ont des aspects communs aux végétaux, comme leur mode de croissance ou leur « force végétative ». Mais ils présentent un certain degré d'animalité, les positionnant ainsi au-dessus des végétaux.

> « De même que dans l'animal véritable, une force végétative est le principe du Psychodié, mais la vie n'y prend pas autant de prépondérance, parce qu'elle n'y est point le résultat du jeu de nombreux organes ajoutés les uns aux autres par action des développements successifs ; cependant l'introduction de l'animalité, c'est-à-dire d'un sens dans le Psychodié, l'élève aussi tôt bien au dessus du végétal, en le laissant cependant bien en dessous de la bête » (Ibid., p. 659-660) (…) « Nous appellerons donc Psychodié tout être végétant, mais ayant au dessus du végétal un sens suffisant pour y introduire aussitôt un **premier degré d'animalité**, mais non c'est animalité complète qui résulte de l'intellect ajouté au simple instinct. » (Ibid., p. 660), *c'est nous qui soulignons.*

La création du règne des Psychodiaires, intermédiaire entre les animaux et les végétaux, marque la fin d'une ère, mais pas encore le début d'une nouvelle. En effet, le milieu du XIX^{e} siècle, avec le développement de la théorie cellulaire (Schleiden et Schwann à la fin des années 1830) et les apports de Charles Darwin relatifs à l'évolution biologique, porte avec lui une révolution dans la façon d'envisager les concepts d'animaux et de végétaux.

- **Le règne Protozoa (Owen, 1859 ; 1860)**

Pour grouper les organismes microscopiques a été proposé le terme Protozoa par l'Allemand Georg August Goldfuss en 1817. Étymologiquement, il signifie : premiers animaux. Pour Goldfuss, il s'agissait d'organismes variés formant une classe au sein du règne animal. Son groupe était équivalent aux Psychodiaires de Bory Saint Vincent[41].

Le développement de la théorie cellulaire modifiera la délimitation des Protozoa aux « animaux » unicellulaires (Siebold, 1845). K.T.E. Von Siebold et H.F. Stannius envisagent les Protozoa comme des animaux avec le plus faible degré d'organisation[42].

Pour ces auteurs, le groupe Protozoa a le rang élevé d'embranchement et non de classe comme chez Goldfuss[43]. Dans les deux cas, les Protozoa appartenaient au règne animal.

Le paléontologue Anglais, Richard Owen (1804-1892), définissait le groupe Protozoa de façon équivalente à K. von Siebold mais il propose d'en faire un règne à part entière en 1859 dans *Encyclopaedia Britannica* puis dans son ouvrage *Paleontology* (1860). Il les définit sur la base de caractéristiques cellulaires mais aussi sur l'absence des caractéristiques des animaux et des végétaux[44].

L'ouvrage *Paleontology* de R. Owen fut publié un an seulement après l'Origine des espèces de Darwin (1859). Il n'élabore pas sa classification sur des fondements évolutifs. Dans cet ouvrage, Owen utilisa des expressions comme « great First Cause » (cité par Sapp, 2009, p. 25) témoignant du recours à un plan divin.

Des systématiciens vont refuser l'utilisation du terme Protozoa considérant qu'il réfère trop aux seuls animaux. C'est le cas de John Hogg, qui propose à la place le règne Primigenum.

[41] Sapp (2009, p. 21)

[42] « Animals in which the different systems of organs are not distinctly separated, and whose irregular form and simple organization is reducible to the type of a cell » (Siebold & Stannius, 1854, p. 15, cité par Ibid., p. 280).

[43] Scamardella (1999, p. 207)

[44] « But the two divisions of organisms called "plants" and "animals" are specialised members of the great natural group of living things; and there are numerous organisms, mostly of minute size and retaining the form of **nucleated cells**, which manifest the common organic characters, **but without the distinctive super-additions of true plants or animals**. Such organisms are called " Protozoa", and include the sponges or *Amorphozoa*, the *Foraminifera* or Rhizopods, the *Polycistineae,* the *Diatomoceae, Desmidiae, Gregarinae,* and most of the so-called *Polygastria* of Ehrenberg, or *infusorial* animalcules of older authors » (Owen, 1860, p. 4, cité par Sapp, 2009, p. 23), *c'est nous qui soulignons*.

- **Le règne Primigenum ou Protoctista (Hogg, 1860)**

John Hogg (1800-1869) travailla beaucoup sur les organismes dont la position systématique était ambigüe. Il considérait qu'il était impossible de distinguer la nature animale ou végétale des micro-organismes[45].

Refusant le terme de Protozoa utilisé par R. Owen, Hogg propose le règne des Protoctista (étymologiquement « premiers êtres vivants ») ou Regnum Primigenum. Il regroupait toutes les créatures inférieures et distinguait les Protophyta des Protozoa, comme étant respectivement de nature végétale et animale.

Il accordait de l'importance à la présence de muscles et d'un système nerveux dans la définition du règne animal et, à l'inverse, son absence caractérisait le règne végétal. Dans son système, les végétaux se définissent ainsi :

> « Vegetables are beings, organic, living, nourishable, stomachless, generative, destructible by death, possessing some sensibility; sometimes motive, and sometimes locomotive in their young or seed state; but inanimate, insentient, immuscular, nerveless, and mostly fixed by their roots » (Hogg, 1860, p. 220, cité par Sapp, 2009, p. 24).

Hogg ne fit pas recours à une vision transformiste basée sur des causes naturelles, pas plus qu'il ne se réfèra à Darwin ou à d'autres auteurs transformistes, ses prédécesseurs, comme Lamarck. Il envisage les Protoctista comme les êtres vivants les plus simples de la Création, par comparaison avec les végétaux et les animaux considérés comme possédant un plus grand degré de perfection.

- **Le règne Primalia (Wilson et Cassin, 1863)**

Une autre proposition d'un troisième règne a été avancée en 1863 par deux Américains, Thomas B. Wilson (1807-1865) et John Cassin (1813-1869), mais moins remarquée des biologistes. Elle a été réalisée sur la base de relations évolutives et de niveaux d'organisation. Le troisième règne, qu'ils nomment Primalia, est formé de cinq sous-règnes : Algae, Lichens, Fungi, Spongiae et Conjugata. Pour ces deux auteurs, les trois règnes du vivant constitueraient des grades distincts. Ils considèrent que le règne Primalia se constitue d'organismes formés d'agrégations de cellules, dépourvues des caractéristiques propres aux végétaux et animaux. Ce groupe serait formé par des formes primaires du vivant.

[45] « Hogg complained that it is "impossible for man to determine whether a certain minute organism be an animal or a plant" (Hogg, 1860, p. 223), as locomotion had long since ceased to indicate animality, and the staining of starch with iodine had been weakened as a criterion to distinguish vegetability » (Rothschild, 1989, p. 284).

> « The organisms constituting the kingdom Primalia are essentially to be regarded as **aggregations of cells** entirely capable of nutrition and propagation, or increase, but without any part of their structure being traceable as vascular in any degree. These organisms are the **primary forms of life and organization**, and have not the distinctive characters or "super-additions," as termed by Professor Owen, of London, of either plants or animals » (Wilson & Cassin, 1863, p. 117), *c'est nous qui soulignons.*

- **Le règne Protista (Haeckel, 1866 à 1904)**

➢ Un biologiste évolutionniste qui a marqué son époque

Ernst Haeckel (1834-1919) fut un biologiste allemand, de surcroît libre penseur et philosophe moniste. Contrairement aux auteurs précédents, E. Haeckel se trouve à l'origine de contributions significatives concernant la biologie des Eucaryotes unicellulaires, notamment des Radiolaires. Il a également contribué à la diffusion des travaux de Darwin de façon très importante ainsi qu'au développement de la théorie de l'évolution. Il reste à l'origine d'un autre système à trois règnes du vivant, très célèbre et résolument ancré dans un cadre de pensée évolutionniste. Son ouvrage *Generelle Morphologie der Organismen* paraîtra en 1866. Il ambitionne de mobiliser la théorie darwinienne d'évolution par descendance avec modification dans le champ de la systématique[46].

Haeckel eut un retentissement considérable. En effet, une version plus populaire de son ouvrage fut publiée en 1868 : *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, traduit en anglais sous le nom *The History of Creation,* puis réédité six fois : de 1868 à 1892. Son ouvrage *Die Welträthsel* traduit en anglais sous le nom *The riddle of the Universe* (1889) a été vendu en 100.000 exemplaires la première année et réédité dix fois et il aura été traduit en 25 langues (*Les énigmes de l'univers* en français)[47] !

➢ Ce que sont les trois règnes du vivant pour Haeckel

Son système consacre un troisième règne nommé Protista. Dans un article paru en anglais en 1869 (p. 29), il en donne l'étymologie suivante : « first of all, primordial ». À la suite de Darwin, Haeckel souhaite élucider les relations entre lignées généalogiques qu'il nomme pour la première fois « phylogénétiques ». Il considère le règne Protista comme le règne des formes primitives : « the kingdom of primitive forms » Haeckel, 1869, p. 29.

[46] « That book, he said, was the "first attempt to introduce the Descent Theory into the systematic classification of animals and plants, and to found a 'natural system' on the basis of genealogy; that is, to construct hypothetical pedigrees for the various species of organisms" »H aeckel, 1880a, p. xiii, cité par Sapp, 2009, p. 28.
[47] Sapp (2009, p. 28-29)

Toutefois conscient du manque de connaissances concernant les organismes unicellulaires, il reconnaîtra que sa proposition était provisoire[48]. À peine trois ans après la publication de son ouvrage, celle-ci n'a d'ailleurs pas manqué d'évoluer.

La figure qu'il propose dans le second volume de son ouvrage (1866) est probablement la représentation d'arbre du vivant la plus connue (cf. figure 31). Il s'agirait du premier arbre phylogénétique (Dobzhansky *et al.*, 1977, p. 242, cité par Rothschild, Ibid., p. 288). Cette figure permet de visualiser les groupes qu'il considère appartenir aux trois règnes. Notons que, dans son ouvrage de 1866, les champignons (Fungi) et les lichens, regroupés au sein des Inophyta, appartiennent au règne végétal (Plantae). Les cyanophycées, futures cyanobactéries (e.g. Nostoc), sont également végétales et n'appartiennent pas encore aux Monera (bactéries). Le règne Protista comprend des organismes nucléés ou non (Monera). Nous pouvons également remarquer que les Infusoires sont considérées comme animales, sachant que leur nature unicellulaire sera montrée en 1873[49]. La figure 32 représente l'arbre détaillé du règne végétal (Plantae).

[48] Rothschild (1989, p. 288)

[49] Scamardella (1999, p. 209)

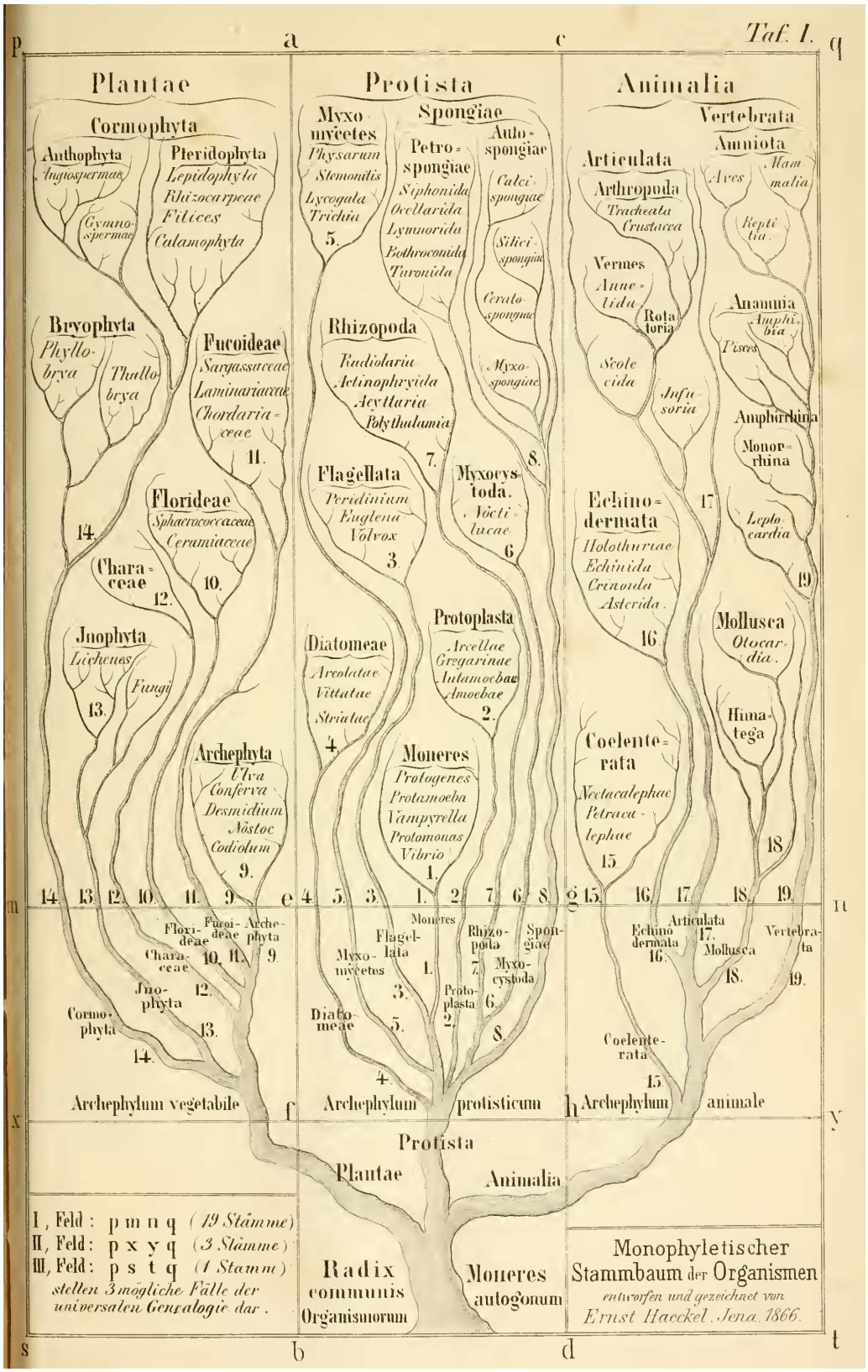


Figure 31 : arbre du vivant proposé par Haeckel (1866, vol. 2 p. 463)

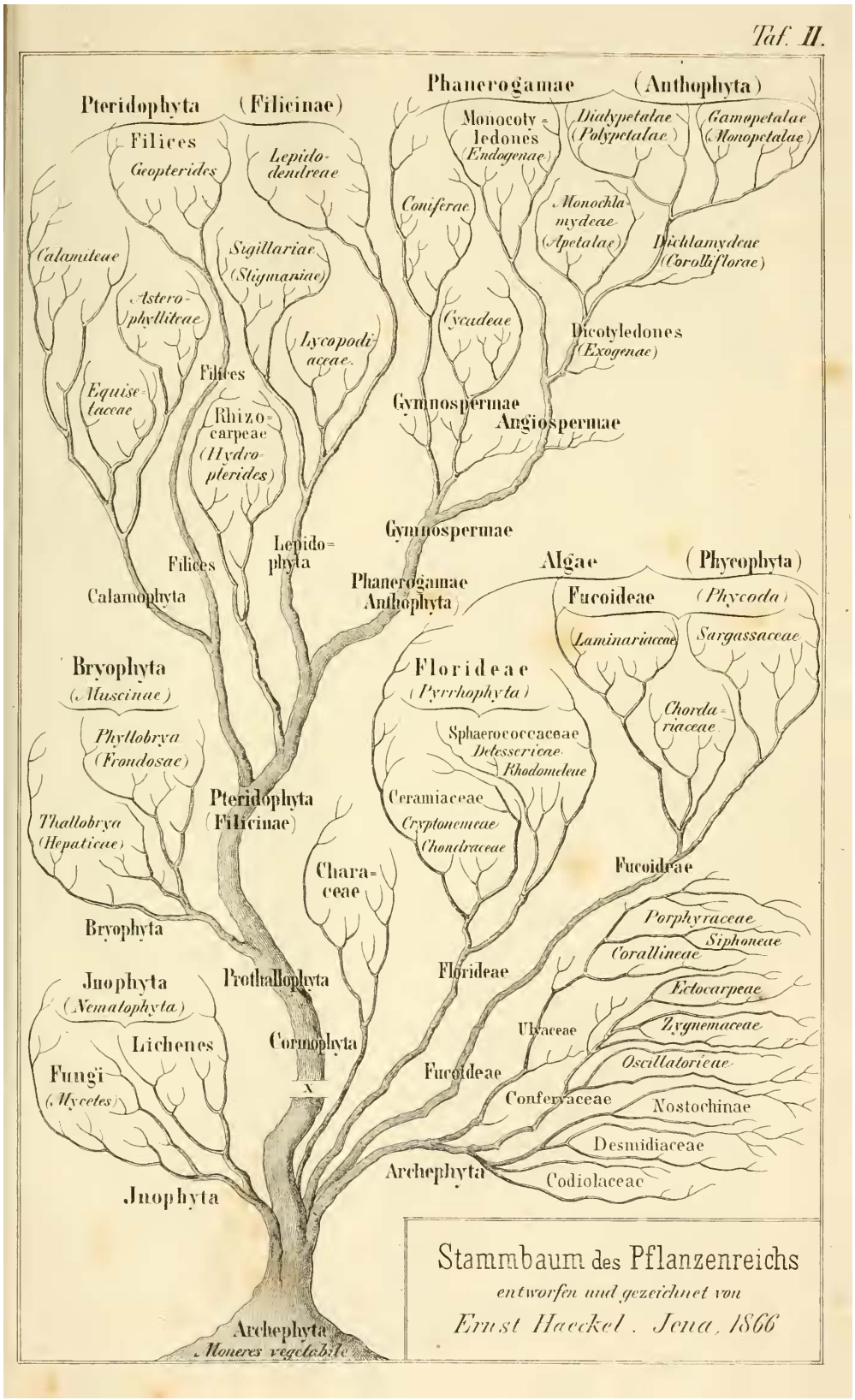


Figure 32 : arbre du règne Plantae proposé par Haeckel (1866, vol. 2, p. 465)

Guillaume Lecointre (2009) discute de la façon dont Haeckel comprend le terme de phylogénie qu'il a proposé pour la première fois alors que Darwin, lui, utilisait celui de

généalogie. Pour Haeckel, la phylogénie serait l'enchaînement des formes au cours du temps[50], mis en parallèle du développement ontogénique dans le cadre de sa célèbre théorie de la récapitulation.

➢ La nature du groupe Protista et l'importance évolutive des Monera pour Haeckel

E. Haeckel ne considérait pas les Protista comme une séparation absolue entre les règnes animal et végétal. Il a donc fondé le groupe des Protista sur des raisons pratiques.

> « I have, of course, by this separation of the Protista from plants on the one side, and from animals on the" other, by no means wished to establish **an absolute and lasting wall of separation between these three organic kingdoms**. Rather, I consider it very probable that **animals as well as plants have derived their origin from the Protista, and in fact from the simplest Protista, the Monera** (1. c. vol. II, p. xx, p. 403, pi. 1). But provisionally I consider it **convenient on practical grounds** to separate the Protista in the system of nature entirely from animals as well as from plants. » (1869, p. 231).

Il divisera par la suite le règne Protista en Protophyta (« one-celled plants ») et Protozoa (« one-celled animals).

Le concept de Monera est très important pour Haeckel sur un plan évolutif. Pourtant, il a été fortement controversé. Pour lui, les Monères sont à regarder comme les formes primitives à l'origine des animaux et des végétaux.

> « The question which has been so often debated during the last twenty years as to a boundary between the animal and vegetable kingdoms will be decided by the Monera, or, more correctly, they will prove that a perfect separation of both kingdoms, in the manner in which it is usually attempted, is impossible. The Monera are apparently such peculiar organisms that they can be classed with equal propriety, or rather with equal arbitrariness, as primitive animals or as primitive plants. They may just as well be regarded as the **first beginnings of animal as of vegetable organization.** But as no one mark of distinction inclines them more to one side than to the other it seems most correct at present to class them as intermediate between true animals and true plants; and to assign them with the Rhizopoda, Amoebae, Diatomaceas, Flagellata, &c, to that **ill-defined kingdom between the animal and vegetable kingdoms which I have called the kingdom of primitive forms Protista**. The Monera are indeed Protista. **They are neither animals nor plants**.

[50] « Depuis Haeckel (1866), nous retenons usuellement la définition floue de phylogénie comme "le cours historique de la descendance des êtres organisés" (Darlu et Tassy, 1993), mélange d'une définition haeckelienne qui voulait parler de **l'enchaînement des formes animales et végétales au cours du temps**, et d'une définition darwinienne parlant des « lignes généalogiques de tous les êtres organisés ». Cependant, le jeu de miroir entre Darwin et Haeckel est trompeur (Darlu et Tassy, 2003). Darwin (1859) ne parle que de généalogie et dessine un modèle de généalogie. Dans un premier temps, il ne dispose pas du mot « phylogénie ». Haeckel (1866) ayant lu Darwin, il a bien compris que les meilleures classifications doivent être généalogiques. Mais il créé le terme de « phylogénie » pour parler de **l'enchaînement des espèces en une « histoire du développement paléontologique des espèces organiques »**. Cette histoire est pour Haeckel l'*histoire* de l'évolution, l'évolution étant elle-même un concept ontogénétique, relevant du développement des individus » (Lecointre, 2009a, p. 302-303), *c'est nous qui soulignons*.

> They are organisms of the **most primitive kind**: among which the distinction between animals and plants does not yet exist. » (Ibid., p. 29), *c'est nous qui soulignons.*

Dans son ouvrage *History of Creation* (1892, 6e éd., vol.2, p. 67 et 72[51]), il distingue deux types de Monera : les phytomonera (*vegetable monera*) et les zoomonera (*animal monera*), qu'ils placent dans un scénario hypothétique.

Les Cyanophyceae (phytomonera) seraient les plus anciennes formes de vie apparues à partir de matériaux inorganiques et sous l'influence de la lumière. Puis seraient apparues les monères carnivores, de nature animale (zoomonera). Plus tard, dans *Die Lebenswunder* traduit en anglais sous le nom *Wonders of life* (1904, p. 32), il indique que les Cyanophyceae (ou Chromacea) étaient les formes les plus anciennes phylogénétiquement et les plus primitives connues (« the oldest phyletically, and the most primitive of all organisms known to us »). Dans ce même ouvrage, il compare la cellule d'une Chromacea à un chloroplaste de cellule d'une algue ou d'autre plante. Il envisage que la bactérie chlorophyllienne pourrait être en symbiose[52] avec une cellule non-verte, théorie que nous envisagerons dans une prochaine section, vue l'importance qu'elle prendra durant la seconde moitié du XXe siècle.

Haeckel s'intéressait beaucoup au problème de l'origine de la vie sur lequel Darwin a très peu écrit dans l'Origine des Espèces (Sapp, 2009, p. 34). Concernant l'origine et la nature phylogénétique du règne Protista, Haeckel (1880) envisage plusieurs hypothèses. La première : celle d'une origine unique, faisant des Protista un groupe monophylétique, et la seconde : celle d'une origine multiple par différents événements de génération spontanée[53] et qui forme un groupe polyphylétique. En l'état des connaissances phylogénétiques, il indiquera que ce débat ne pouvait pas être tranché.

Les spéculations phylogénétiques[54] de Haeckel inspireront certains auteurs alors que pour d'autres elles seront considérées comme dénuées de toute valeur scientifique. De nombreux biologistes pensaient en effet que la phylogénie devait être distincte de la taxonomie.

---

[51] Sapp (2009, p. 39)

[52] « On the strength of this significant comparison, one of our ablest and most open-minded scientists, Fritz Müller-Desterro, of Brazil, pointed out in 1893 that we may see in every green vegetal cell a symbiosis between plasmodomous [*autotrophic*] green and plasmophagous [*heterotrophic*] not - green companions » (Haeckel, 1904, p. 196).

[53] Notons que Haeckel mobilise la génération spontanée alors que la controverse entre Pouchet et Pasteur a été tranchée en 1865 par l'Académie des Sciences en France. Sapp (2009, p. 36-37) rapporte que pour Haeckel (1904) les expériences de Pasteur ne veulent rien dire concernant l'origine de la vie à partir de matériaux inorganiques. Elles prouvent seulement que dans certaines conditions artificielles, les Infusoires ne peuvent pas se former à partir de composés organiques en décomposition.

[54] « With regard to the *palæontological development of the kingdom Protista*, we may form **various, but necessarily very unsafe, genealogical hypotheses.** Perhaps the individual classes of the kingdom are independent tribes, or phyla, which have developed independently of one another and independently of the animal and the vegetable kingdoms. Even if we adopt **the monophyletic hypothesis of descent,** and maintain a common origin from a single form of Moneron for all organisms, without exception, which ever have lived and still live upon the earth, even in this case the connection of the neutral Protista on the one hand with the

➢ Une classification actualisée au fil des publications

Trois ans après la publication de *Generelle Morphologie der Organismen*, il modifiera sa classification (1869) en rattachant les spongiaires aux animaux car leur nature animale a été montrée au regard de leur développement larvaire[55]. Dans son ouvrage, *History of Creation* (Ibid., p. 127-128), il envisage que tous les animaux, spongiaires inclus, passent par un même développement ontogénique qu'il nomme gastrula (possédant une bouche et un intestin). Il établit un parallèle entre ontogénèse et phylogenèse, il envisage au cours de l'histoire de la lignée animale un stade commun nommé gastraea.

Outre cette organisation, il prend en compte le critère de l'absence de reproduction sexuée pour définir le règne Protista dans son article de 1869.

> « The most important physiological characteristic of the kingdom Protista lies in the exclusively **non-sexual propagation** of all the organisms belonging to it. The higher animals and plants multiply almost exclusively in a **sexual manner** » (Haeckel, 1880, p. 69), *c'est nous qui soulignons.*

Il déplace les champignons du règne végétal vers le règne Protista. La position systématique des champignons change donc, pour un temps, mais sans pour autant constituer un règne à part. Outre l'absence de reproduction sexuée (présumée), il justifie le déplacement des champignons hors des végétaux par la différence de nutrition, en particulier l'absence de chlorophylle. Notons que l'importance de la chlorophylle pour l'utilisation du dioxyde de carbone chez les végétaux a été mise en évidence trente ans auparavant par Henri Dutrochet en 1837.

> "Above all, one would be justified in removing the large and multiform class of Fungi from the vegetable kingdom, and placing them near Myxomycetes among the Protista. The whole method of **nourishment and assimilation of the fungi, in connection with many other characters (especially the total absence of chlorophyll**), remove them so far from the true plants that the earlier botanists long since wished to establish for the fungi a special organic kingdom." (1869, p. 329), *c'est nous qui soulignons.*

---

vegetable kingdom, and on the other hand with the animal kingdom, must be considered as very vague. (…) But if we adopt the **polyphyletic hypothesis of descent**, we have to imagine a number of organic tribes, or phyla, which all shoot up by spontaneous generation out of the same ground, by the side of and independent of one another. In that case numbers of **different Monera must have arisen by spontaneous generation** whose differences would depend only upon slight, to us imperceptible, differences in their chemical composition, and consequently upon differences in their capability of development. **A small number of Monera would then have given origin to the animal kingdom, and, again, a small number would have produced the vegetable kingdom**. Between these two groups, however, there would have developed, independently of them, a large number of independent tribes, which have remained at a lower stage of organization, and which have neither developed into genuine plants nor into genuine animals. (…) **A safe means of deciding between the monophyletic and polyphyletic hypotheses is as yet quite impossible, considering the imperfect state of our phylogenetic knowledge**. »(Haeckel, 1880b, p. 71-73)

[55] Rothschild (1989, p. 290)

Nous verrons qu'il changera d'avis par la suite à propos de la place des champignons. Il les réintègrera parmi les végétaux en dépit de leur nutrition hétérotrophe.

Les Monères (bactéries) forment un groupe des Protista, mais ces derniers ne contiennent pas encore les cyanophycées, déplacées parmi les Protista en raison de l'absence de reproduction sexuée (Ibid., p. 329).

La figure 33 présente les dix groupes qu'Haeckel regroupait parmi les Protista en 1869.

Kingdom of the Protista, or of Monogenetic Organisms (organisms which reproduce themselves exclusively in a non-sexual manner, by monogony).

Group I. MONERA.

1. Gymnomonera (Protogenes, Protamœba, &c.).
2. Lepomonera (Protomonas, Vampyrella, Protomyxa, &c.).

Group II. FLAGELLATA.

1. Nudiflagellata (Euglena, Spondylomorum, &c.).
2. Cilioflagellata (Peridinium, Ceratium, &c.).

Group III. LABYRINTHULEA (Labyrinthulæ).

Group IV. DIATOMEA (Bacillaria).

Group V. PHYCOCHROMACEA (Myxophycea).

1. Chroococcacea (Glœocapsa, Merismopœdia, &c.).
2. Oscillarinea (Nostochacea, Rivulariacea, &c.).

Group VI. FUNGI (Mycetes).

1. Phycomycetes (Saprolegnieæ, Mucorinæ, &c.).
2. Hypodermiæ (Uredineæ, Ustilagineæ, &c.).
3. Basidiomycetes (Hymenomycetes, Gastromycetes, &c.).
4. Ascomycetes (Protomycetes, Discomycetes, &c.).

Group VII. MYXOMYCETES (Mycetozoa).

Group VIII. PROTOPLASTA (Amœboida).

1. Gymnamœbæ (Autamœba, Nuclearia, &c.).
2. Lepamœbæ (Arcella, Difflugia, &c.).
3. Gregarinæ (Monocystida et Polycystida).

Group IX. NOCTILUCÆ (Myxocystoda).

Group X. RHIZOPODA.

1. Acyttaria (Monothalamia et Polythalamia).
2. Heliozoa (*Actinosphærium Eichhornii*).
3. Radiolaria (Monocyttaria et Polycyttaria).

Figure 33 : les dix groupes du règne Protista de Haeckel (1869, p. 330-331)

En 1878, il inclut les Ciliés (ex Infusoires) parmi les Protista au lieu des animaux en raison de l'absence de stade larvaire (Rothschild, 1989, p. 290). Dans son ouvrage *History of the Creation*, il place à nouveau les champignons comme en 1866 parmi le règne végétal, qu'il estime monophylétique. Au sein des végétaux, ils appartiennent aux Cryptogames (terme employé par Linné) et plus précisément au sein des Thallophytes (cf. figure 34).

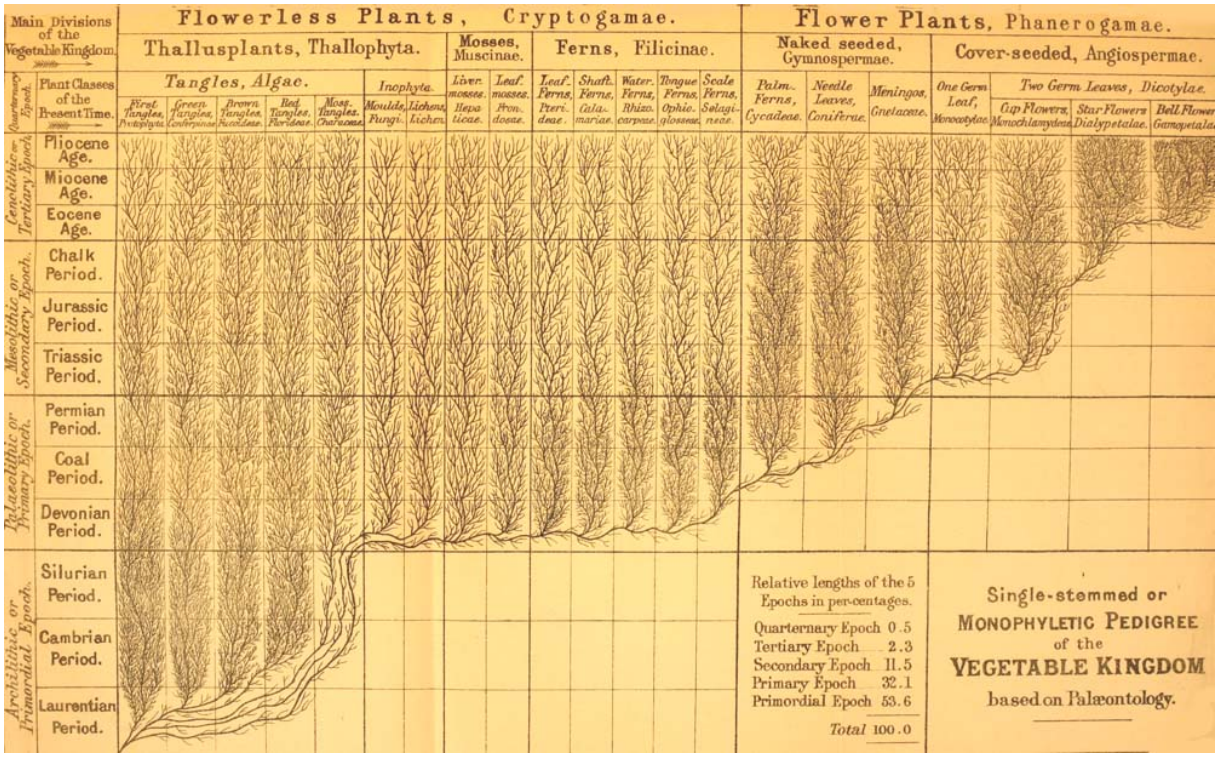


Figure 34 : arbre du règne végétal. Table V. Reproduit de Haeckel 1880, p. 112.

Dans cet ouvrage, Haeckel discute de la place phylogénétique des champignons dans l'arbre du vivant et de leur origine évolutive. Il propose deux scénarii : dans le premier, les champignons ont une origine algale ; dans le second, ils descendraient d'un monère. Le tableau 21 compare les arguments concernant la parenté des champignons et des végétaux.

Arguments pour soutenir la parenté des champignons et des végétaux	**Arguments pour exclure les champignons des végétaux**
Ressemblance importante entre des champignons (Phycomycetes) et des algues (Siphoneæ) Seule différence : absence de chlorophylle chez les Phycomycètes	Différence entre les champignons et les végétaux concernant leur mode de nutrition. Les champignons consomment de la matière organique comme les animaux[56]

Tableau 21 : les deux hypothèses concernant la place des champignons

[56] « But, on the other hand, all genuine Fungi have so many peculiarities, and deviate so much from other plants, especially in their mode of taking food, that they might be considered as an entirely distinct province of the vegetable kingdom. Other plants live mostly upon inorganic food, upon simple combinations which they render more complicated. They produce protoplasm by the combination of water, carbonic acid, and ammonia. They take in carbonic acid and give out oxygen. But the Fungi, like animals, live upon organic food, consisting of complicated combinations of carbon, which they receive from other organisms and assimilate. They inhale oxygen and give out carbonic acid like animals. They also never form leaf-green, or chlorophyll, which is so characteristic of most other plants. In like manner they never produce starch. Hence many eminent botanists have repeatedly proposed to remove the Fungi completely out of the vegetable kingdom, and to regard them as a special and third kingdom, between that of animals and plants » (Haeckel, 1880, p. 94-95)

Sans prétendre trancher définitivement la question, il propose de rattacher les champignons aux algues et par conséquent au règne végétal, malgré la différence de nutrition dont il a parfaitement conscience.

> The phyletic origin of Fungi will probably long remain obscure. The close relationship already hinted at between the Phycomycetes and Siphoneæ (especially between the Saprolegniæ and Vaucheriæ) suggests to us that **they are derived from the latter**. **Fungi would then have to be considered as Algæ**, which by adaptation to a parasitical life have become very peculiarly transformed » (Ibid., p. 95), *c'est nous qui soulignons.*

Cette citation illustre par ailleurs sa conception gradiste des relations phylogénétiques puisqu'il avance que les champignons Phycomycètes dériveraient des algues Siphoneae.
Dans son livre de 1904 (*The Wonders of Life*), il précise le scénario évolutif qu'il envisage pour expliquer que les champignons sont des végétaux, malgré un mode de nutrition différent. L'acquisition chez les champignons d'un mode de vie hétérotrophe (qu'il nomme « plasmophagous ») à partir d'un ancêtre végétal résulterait, selon lui, d'une perte secondaire. L'extrait suivant nous semble résumer son modèle phylogénétique.

> « The extensive class of the fungi (or *mycetes)* resembles a part of the bacteria in regard to metabolism. These organisms are, it is true, generally regarded as plants, but **they have not the capacity of the green, chlorophyll bearing plants to supply themselves with carbon from the carbonic acid in the atmosphere.** They have to take it from organic substances, such as albumin, carbohydrates, etc., like the animals. But while the animals have to derive their nitrogen from the latter, the fungi can obtain it from inorganic matter in the earth. Fungi cannot support life without the addition of organic compounds; but we can make them grow in a food solution consisting of sugar and purely inorganic nitrogenous salts. Thus they are **on the border that separates the plasmodomous[57] plants from the plasmophagous animals**. Like the latter, **the fungi have evolved from the plants through changed food conditions.** We find this process even among the unicellular protists in the phycomycetes, which descend from the siphonea. In the same way **the real multicellular fungi (ascomycetes and basimycetes) may be traced to the tissue-forming algae** » (Haeckel, 1904, p. 215-216), *c'est nous qui soulignons.*

Son raisonnement se base sur une comparaison d'unicellulaires flagellés dont certaines espèces sont chlorophylliennes et d'autres, pourtant très ressemblantes, ne le sont pas. De façon implicite, Haeckel se base sur la ressemblance structurale pour inférer une parenté entre ces organismes. L'absence de chlorophylle est interprétée comme une perte à partir d'un

[57] « We give it the name of plasmodomism *(domeo* =to build up), or carbon-assimilation. (…) It means that the plant is able, under the influence of sunlight, to form carbo-hydrates, and from these new plasm, out of simple inorganic compounds (water, carbonic acid, nitric acid, and ammonia) by synthesis and reduction. The animal is unable to do this. It has to take its plasm in its food from other organisms-plant-eaters directly, and animal-eaters indirectly. We therefore give the title of *plasmophagous* to these animal "plasma-eaters." » (Haeckel, 1904, p. 212).

ancêtre chlorophyllien, comme l'indique l'expression : « from which they are descended (volvocina, peridinia) ». Il transfère ce raisonnement de perte secondaire à d'autres groupes présentant des ressemblances structurales, dont les champignons qui descendraient des algues. Notons que ce raisonnement phylogénétique se trouve également appliqué aux plantes à fleurs parasites, telles que les orobanches. Nous le notons avec intérêt, au regard de l'analyse didactique des difficultés posées par cette espèce aux étudiants (cf. chapitre 2)[58].

Dans ce même ouvrage, Haeckel (1904) fait évoluer son système à quatre règnes en un système à deux règnes, offrant à l'organisation cellulaire son premier critère de classification en distinguant les règnes Protista (unicellulaires) et Histonia (pluricellulaires). Le premier se subdivise en Protozoa et Protophyta, le second en Metazoa et Metaphyta. Au sein des Histonia, l'organisation tissulaire devient un critère de distinction important[59]. L'organisation tissulaire indique des stades évolutifs successifs : les tissus « simples » des thallophytes (algues et champignons) étant les plus anciens phylogénétiquement. Nous pouvons constater que l'absence de tissu vasculaire (conducteur de sèves) forme ici un grade, défini par « défaut ».

Après avoir présenté la classification de Haeckel et son évolution entre 1866 et 1904, réalisons un bilan sur la façon dont il conçoit le règne végétal.

- **La nature du règne végétal pour Haeckel**

Nous venons donc de voir que le contour du règne végétal a changé pour Ernst Haeckel suivant les changements successifs de classification. Nous avons, par exemple, remarqué dans l'article de 1869 l'attachement à deux critères (modes de reproduction et de nutrition) l'ayant conduit à exclure les champignons des végétaux et à les rattacher au règne Protista. Mais, cette proposition n'a duré qu'un temps et E. Haeckel rattachera ensuite les champignons avec les algues au sein du règne végétal, et plus précisément dans le groupe des Thallophytes.

[58] « The longer plasmophagous flagellata, which are colorless, and have no chlorophyll (monodina, conoflagellata), closely resemble in form and movement the older plasmadomous and chlorophyll-bearing mastigota, from which they are descended (volvocina, peridinia); **they only differ in the manner of nutrition**. (…) In **the same way** we can derive the **phycomycetes by metasitism from the siphonea, the fungi from the algae**; and, finally, the process is also found in many of the **higher parasitic plants** (orchids, orobanches, etc.). » (Haeckel, 1904, p. 217), *c'est nous qui soulignons.*

[59] « The stable communities of cells which make up the body of the histona, or **multicellular plants and animals**, are called **tissues** *(tela* or *hista).* » (Haeckel, 1904, p. 161). « In the **lower tissue-forming plants**, the algae and fungi, the plant-body has the appearance of a **layer of cells,** the tissues of which show little or **no division of labor**. In these *thallophyta* there are **none of the conducting or vascular fibres,** the formation of which is of great importance in the higher plants in connection with their physiological function of circulation of the sap. (…) The primary tissues are the **phylogenetically older and histologically simple** "cell-tissues," such as we have in the thallophyta (algae, fungi, and mosses); in these there are no conducting fibres, or, at least, only rudimentary ones. The secondary tissues are a **later development** from these; they form conducting and vascular fibres and other highly differentiated forms of tissue » (Haeckel, 1904, p. 162), *c'est nous qui soulignons.*

Nous proposons de modéliser la problématisation mise en œuvre par E. Haeckel qui fonde sa classification dans les deux ouvrages *The History of Creation* et *The Wonders of Life*. En particulier, nous nous attacherons à l'analyse de la place des végétaux dans son système classificatoire et leurs relations phylogénétiques avec les autres groupes.

Nous proposons de modéliser le raisonnement de l'auteur sous la forme d'un espace de contraintes et de nécessités (Lhoste, 2008; Lhoste & Peterfalvi, 2009). La forme de cette modélisation est issue des espaces-problèmes développés par Christian Orange (Fabre & Orange, 1997; Orange, 2000). Développée dans le champ de la didactique pour comprendre la construction de problèmes par des apprenants, elle a été utilisée par d'autres didacticiens avant nous pour modéliser des problématisations de scientifiques dans le champ de l'histoire des sciences : C. Orange (2003) en physiologie sur les travaux de Claude Bernard ; D. Orange Ravachol (2003) en géologie, notamment sur les travaux de Xavier Le Pichon ; et P. Crépin-Obert (2010) en paléontologie sur la controverse entre Guettard et Voltaire.

Cette modélisation vise à rendre compte de la construction de nécessités, à partir de données (empiriques ou théoriques) qui contraignent le champ des possibles. Les contraintes sont donc des éléments « déjà-là » convoqués dans le raisonnement alors que les nécessités sont des construits nouveaux. Cette mise en relation est réalisée dans un registre explicatif donné, sur lequel s'appuie la construction du modèle explicatif.

Rappelons que cette modélisation est réalisée par le chercheur grâce à l'analyse de l'argumentation développée par les étudiants dans un cadre didactique ou par les scientifiques du passé dans un cadre historique.

La figure 35 représente la mise en relation entre les contraintes empiriques et théoriques sur lesquelles Haeckel s'appuie pour élaborer certaines nécessités sur les modèles explicatifs, modèles qui constituent des réponses au problème étudié.

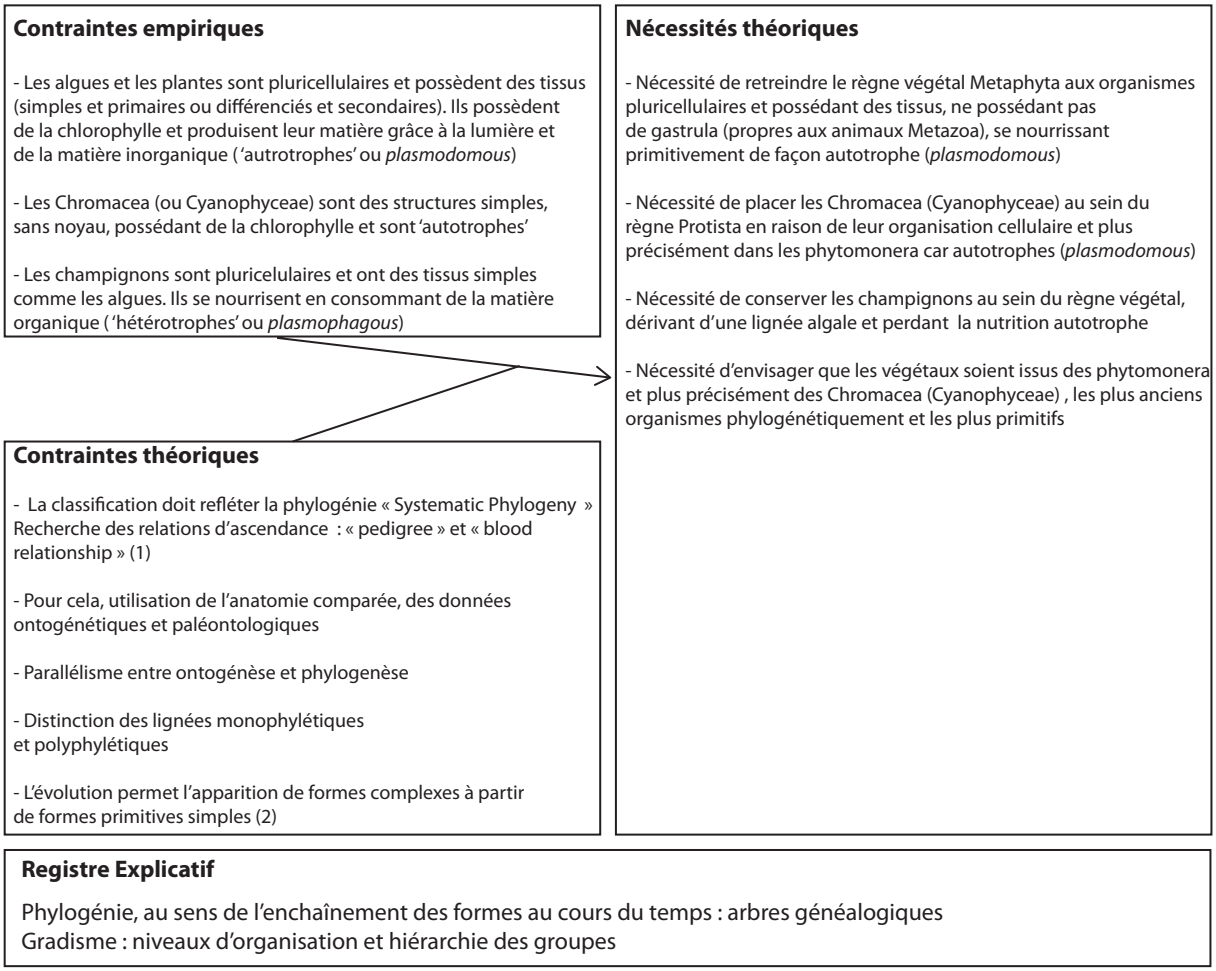


Figure 35 : modélisation de la problématisation réalisée par E. Haeckel et fondant sa classification, en focalisant l'analyse sur les végétaux

Cette modélisation est structurée à partir de l'analyse des écrits d'Haeckel réalisée précédemment. Du point de vue des nécessités construites par l'auteur, nous n'avons reporté ici que des nécessités sur les modèles (de nature théorique), érigées à partir de la mise en relation d'éléments de nature empirique et théorique qui contraignent leur élaboration. Les deux citations suivantes apportent un éclairage complémentaire pour comprendre le registre explicatif mobilisé et présenté dans la figure ci-dessus.

> 1 : « Every attempt that we make to gain a knowledge of the **pedigree** of any small or large group of organisms related by blood must, in the first instance, start with the evidence afforded by the existing "natural system" of this group. For although the natural system of animals and plants **will never become finally** settled, but will always represent **a merely approximate knowledge of true blood relationship**, still it will always possess great importance as a hypothetical pedigree. It is true, by a "natural system" most zoologists and botanists only endeavour to express in a concise way the subjective conceptions which each has formed of the objective "form-relationships" of organisms. These form-relationships, however, as the reader has seen, are in reality the necessary result of **true blood relationship**. Consequently, every morphologist in promoting our knowledge

> of the natural system, at the same time promotes our knowledge of the pedigree, whether he wishes it or not. The more the natural system deserves its name, and the more firmly it is established upon the concordance of results obtained from the study of **comparative anatomy, ontogeny, and palæontology**, the more surely may we consider it as the approximate expression of the true pedigree of the organic world » (Haeckel, 1880, p. 77-78) *c'est nous qui soulignons.*
>
> 2. « The two great principles of organic development which have been pointed out as the necessary results of natural selection in the Struggle for Life, namely, **the laws of differentiation and perfecting** » (Ibid. p. 115), *c'est nous qui soulignons.*

En conclusion de cette sous-section, plusieurs propositions d'un troisième règne du vivant ont été formulées au cours du XIX^e^ siècle. Elles peuvent être comparées aux deux changements théoriques majeurs survenus en biologie au cours de ce siècle : la théorie cellulaire et la théorie de l'évolution. La classification de Bory de Saint Vincent (1824) se singularise des quatre autres, ces dernières se positionnant dans le cadre de la théorie cellulaire. Les systèmes classificatoires de Wilson et Cassin, d'une part, et d'Haeckel, d'autre part, se démarquent de ceux d'Owen et de Hogg par un positionnement explicitement évolutionniste. Haeckel a proposé un système qui a eu le plus de retentissement et dans lequel l'organisation uni ou pluricellulaire constitue le premier critère de son ultime système en 1904. Ainsi, un être vivant n'est alors plus conçu comme une entité unique mais comme une communauté de cellules interdépendantes. Les critères cellulaires, inscrits dans une pensée évolutionniste, ont contribué à repenser les grandes divisions du vivant. Pour Haeckel, les végétaux sont des organismes pluricellulaires pourvus de tissus et, primitivement, autotrophes (*plasmodomous*, dit-il dans la traduction anglaise) bien que ce mode de nutrition ait évolué dans certains groupes végétaux, comme les champignons et les plantes « supérieures » parasites. Les végétaux dérivent pour Haeckel des phytomonera, plus précisément des Chromacea (Cyanophyceae). Il accordait une grande importance phylogénétique aux Monères, considérées comme les premières formes de vie. Mais il les inclut dans le règne hétérogène des Protista, aux côtés d'organismes nucléés.

Après l'introduction d'un troisième règne du vivant au XIX^e^ siècle, le développement de la bactériologie va contribuer à modifier à son tour la classification par l'introduction d'un quatrième règne au XX^e^ siècle. Mais il nous auparavant présenter le renouvellement du contexte théorique dans les années 1930-1940 avec le développement de la nouvelle systématique dans le cadre de la synthèse moderne de l'évolution.

2.1.3. Un nouveau contexte systématique : le développement de la « nouvelle systématique » ou « systématique évolutionniste »

Les années 1930 et 1940 sont marquées par le développement de la théorie synthétique de l'évolution (ou néodarwinisme) nommée « synthèse moderne » par Julian Huxley (1887-1975) en 1942. Cette synthèse évolutionniste est une tentative d'unification de la biologie réunissant des travaux de différents champs : botanique, zoologie, écologie, paléontologie, embryologie, génétique. Elle étend la théorie darwinienne de l'évolution qui méconnaissait au XIX^e^ siècle les fondements génétiques de l'hérédité. Les travaux de R.A. Fisher, S. Wright et J.B.S Haldane ont permis de combiner la génétique mendélienne, la théorie de la sélection naturelle avec des études statistiques des variations génétiques à l'échelle populationnelle. Ainsi, pour Theodosius Dobzhansky (1900-1975), l'évolution est un changement dans la constitution génétique des populations (*Genetics and the Origin of Species*, 1937, cité par Sapp, 2009).

C'est dans ce contexte que se développe, à partir des années 1930, la nouvelle systématique ou systématique évolutionniste pour accompagner la synthèse moderne en biologie évolutionniste. Deux ouvrages importants sont *The New Systematics (Huxley, 1940)* et *Systematics and the Origin of Species* (1942) d'Ernst Mayr (1904-2005). Le premier, un ouvrage collectif, comprend vingt-deux contributeurs de différentes disciplines, avec pour objectif de redynamiser la systématique. En effet, Huxley déplore alors la perception négative de la systématique par les biologistes non systématiciens[60].

À travers leurs ouvrages, J. Huxley et E. Mayr souhaitent apporter une réflexion philosophique et méthodologique à la systématique, en tentant d'éclairer notamment ce que l'on entend par classification naturelle, ou encore la nature de la relation entre taxonomie et phylogénie. Pour ces néosystématiciens, la classification se doit d'être compatible avec les hypothèses phylogénétiques.

Mais les objectifs de la nouvelle évolutionniste soulèveront de vives protestations. Certains biologistes considèrent notamment qu'il fallait mettre fin aux spéculations phylogénétiques en taxonomie. Nous y reviendrons ultérieurement et de façon plus approfondie (cf. p. 250).

C'est donc dans ce contexte de relations non clarifiées et non consensuelles entre phylogénie et taxonomie que se développèrent les différents systèmes classificatoires entre les années 1930 et 1970, dont celui de Copeland (1938).

[60] « Systematics was perceived by experimentalists as " a rather narrow branch of biology on the whole empirical and lacking in unifying principles, indispensable as a basis for all biological workers, but without much general interest or application, to other branches of their science" » (Huxley, 1940, p. 1 cité par Sapp, 2009, p. 80).

2.1.4. Le problème de la place des bactéries : un quatrième règne du vivant

- **Nature du problème**

Pendant longtemps, et comme l'indique l'expression flore bactérienne, les bactéries ont été considérées comme des végétaux. Elles étaient désignées comme « fission fungi » ou « fission plants » (Sapp, 2009, p. xiii). La bactériologie s'est développée dans les années 1860 en lien avec la « théorie des germes », expliquant l'origine de maladies par la présence de micro-organismes. Cette discipline a d'abord été une science appliquée en s'intéressant principalement aux espèces en relation avec l'espèce humaine. Le développement des techniques a largement contribué à l'essor de ce champ d'étude, comme celui des techniques de stérilisation et de pasteurisation (1865) par Pasteur qui permettra la culture de lignées pures, ou encore la technique de coloration développée par Gram en 1884. L'étude des micro-organismes était limitée par les techniques de microscopie alors disponibles. Le développement de la microscopie électronique et de la génétique bactérienne favorisera un important développement des connaissances sur les bactéries.

Comme nous l'avons présenté précédemment, E. Haeckel donne une grande importance aux Monera, mais en les maintenant dans le règne plus vaste des Protista.

En 1925, Édouard Chatton (1883-1947), alors professeur à l'université de Strasbourg, propose comme première dichotomie du vivant la distinction Eucaryotes, organismes possédant des cellules nucléées, et Procaryotes, aux cellules dépourvues de noyau. E. Chatton n'a dit que peu de choses concernant ces deux groupes :

> « Chatton may have said **little about that organizational dichotomy**, but in effect he had said just enough. 'Procaryote' was a **neutral term** that could be molded to contemporary science. » (Sapp, 2007, p. 783) « He used the terms '**procaryote'** and '**eucaryote'** in two diagrams in 1925, and in his only published statement about it, in 1938 (typically miscited as 1937)" (Ibid., p. 781), *c'est nous qui soulignons.*

- **Le système à quatre règnes de Copeland (1938)**

Herbert F. Copeland (1902-1968), enseignant de biologie au Sacramento City College en Californie, publie en 1938 un article[61] intitulé *The Kingdom of Organisms* dans lequel il propose pour la première fois une classification à quatre règnes du vivant. Ses quatre règnes sont : Monera, Protista, Plantae et Metazoa. Nous allons présenter ici la délimitation de ses

[61] Le nombre de citations d'un article dans les bases bibliographiques constitue un indicateur partiel de son influence scientifique. Nombre de citations en février 2016 de l'article de Copeland (1938) : Scopus : - / WOS : 52 / Scholar : 100 citations, respectivement dans la base Scopus d'Elsevier, Web of Science (WOS) de Thomson Reuters et dans le moteur de recherche Google scholar.

règnes qui diffèrent de ceux d'Haeckel pour plusieurs d'entre eux et ce malgré des noms communs. Tout d'abord, il semble important de signaler que H.F. Copeland possédait une visée phylogénétique : il souhaitait réviser la classification pour constituer des groupes naturels, partageant un ancêtre commun. Pour lui, la classification se fonde à la fois sur des hypothèses phylogénétiques mais aussi sur des aspects pratiques, comme celui de ne pas former des groupes trop nombreux ou encore sur la possibilité de définir les groupes par une description[62].

Le règne Monera est caractérisé par l'absence de noyau, les distinguant des autres lignées. De plus, Copeland les considère comme les descendants les plus proches de la première forme de vie apparue sur Terre.

> « The Monera are here treated as a kingdom on the basis of two assumptions: that they are the comparatively **little modified descendants of whatever single form of life first appeared on earth**, and that they are sharply distinguished from other organisms **by the absence of nuclei** » (Copeland, 1938, p. 386), *c'est nous qui soulignons.*

Il y inclut quatre groupes : les « bactéries autotrophes » (telles que les Thiobacteria), les « bactéries ordinaires », les « spirochaetes » et enfin les « algues bleues-vertes » (Cyanophyceae).

Les trois autres règnes sont constitués d'organismes nucléés. Les animaux (Metazoa) ne sont pas modifiés par rapport à Haeckel, mais Copeland discute de la place incertaine des Spongiaires (p. 415). Par contre, la délimitation des végétaux et des Protistes a beaucoup changé par rapport à Haeckel. En effet, le règne Protista comprend pour le biologiste américain neuf groupes : « pigmented et animal-like Flagellata, Rhizopoda, Sporozoa, Infusoria, diatoms, red algae, brown algae, and Fungi » (Ibid., p. 416).

Si certains d'entre eux sont manifestement artificiels, il pense cependant que l'ensemble est naturel au sens où il descend d'un ancêtre commun nucléé (Ibid., p. 409). Il réalise un schéma original dans lequel toutes les branches ne sont pas reliées entre-elles et où sont indiqués les temps géologiques. Sur une branche s'individualisant des Monera durant l'ère « Archaeozoic », Copeland positionne l'apparition du noyau (cf. figure 36). Il reconnaît que,

[62] « The limits assigned to a particular group, one which is named, assigned to a definite taxonomic category, and defined by description, are always artificial, arbitrary, decided by convenience. **Convenience** at this point means something subordinate to the overriding convenience or necessity of recognizing groups which are **natural**. A conservative element of convenience is familiarity: the taxonomist is loath to propose abandonment of a familiar arrangement unless he can propose one **in better conformity to relationship**. Another element of convenience lies in the varying inclusiveness proper to groups of different categories: phyla and classes should **not be too numerous** families and genera should not be too extensive. A third element of convenience lies in feasibility of definition by description (…). The formulation of a system of classification, then, involves a double set of hypotheses: **hypotheses as to the ancestry, origin, and evolution of groups**, and hypotheses as to **what boundaries will be found expedient** » (Copeland, 1938, p. 383-384), *c'est nous qui soulignons.*

sur un plan taxonomique, la création du règne Protista répond à des préoccupations pratiques dont celui de la définition par la description. Il définit les Protista par des caractéristiques nucléaires, qu'il considère comme primitives[63] : la permanence de la membrane nucléaire durant la division cellulaire, la présence d'un centrosome et d'un fuseau intranucléaire. Ces caractéristiques peuvent disparaître secondairement dans certaines lignées.

Le critère de l'unicellularité, cher à Haeckel dans son dernier système distinguant Protista et Histonia, n'est pas mobilisé par Copeland pour définir son règne Protista. En effet, celui-ci comprend notamment les algues brunes et rouges, ainsi que les champignons.

Le règne végétal, nommé Plantae, est réduit au groupe nommé Chlorophyta, regroupant les algues vertes et les « plantes supérieures » (nommées Embryopha). Les caractéristiques partagées sont la présence de quatre pigments dans les plastes verts (chlorophylles A et B, carotène et xanthophylle) ainsi que la cellulose et l'amidon véritables.

> « The limits of the plant kingdom are those which will include the two groups Chlorophyceae (green algae) and Embryophya (higher plants). The positive characters are the possession of chloroplasts, that is, of plastids containing the four pigments Chlorophyll A, Chlorophyll B, carotin, and xanthophyll (and no others), and the production of two specific carbohydrates, true starch and true cellulose. » (Ibid., p. 412).

Par ailleurs, il note que certains de ces caractères sont apparus également chez certains Protista. Les végétaux seront définis par leur combinaison entière des caractères définissant les végétaux.

> « Some of these characters appear to some extent among Protista. The plastids of Heterokontae, chloromonads, and euglenids can scarcely be called anything but chloroplasts, though they may differ from those of proper plants in the relative abundance of the different pigments. (…) But no organisms except proper plants show **the complete combination** of plant characters » (Ibid., p. 412), c'est nous qui soulignons.

Il envisage les algues vertes unicellulaires du groupe des Volvocales, comme étant le groupe ancestral des végétaux (p. 416), témoignant ainsi de sa conception gradiste de l'évolution.

[63] « The apparently most primitive of known nuclei have a membrane which does not disappear during mitosis, but divides by constriction. Centrosomes, and spindles formed within the intact nuclear membrane, are features of very primitive, if not of the most primitive nuclei. We may regard the permanent nuclear membrane, the centrosome, and the intranuclear spindle, as the positive characters of typical Protista. All these characters fade out in the evolution of various lines: we find the nuclear membrane disappearing at earlier and earlier stages in brown algae and in Fungi. » (Copeland, Ibid., p. 409)

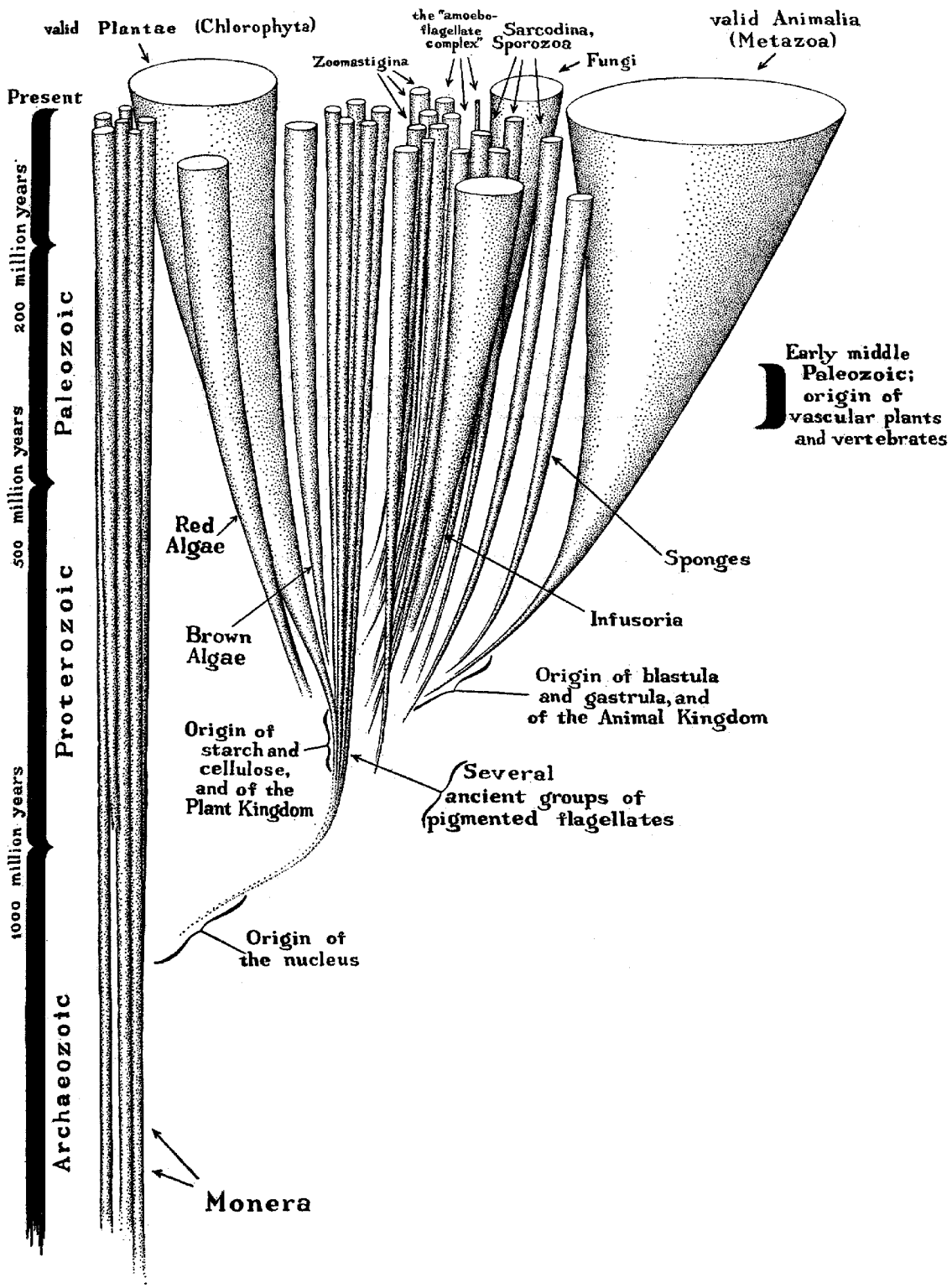


FIG. 8. DIAGRAM OF THE GENERAL PHYLOGENY OF ORGANISMS AS PRESENTED IN THE PRESENT PAPER

Figure 36 : phylogénie proposée par H. F. Copeland (1938, p. 410)

- **Modélisation de la problématisation de Copeland**

La figure 37 présente notre interprétation de la problématisation de H.F. Copeland, en focalisant principalement sur la délimitation qu'il propose pour démarquer le règne végétal des trois autres règnes du vivant. Notre analyse se base sur les éléments discutés précédemment ainsi que sur les citations référencées de 1 à 4.

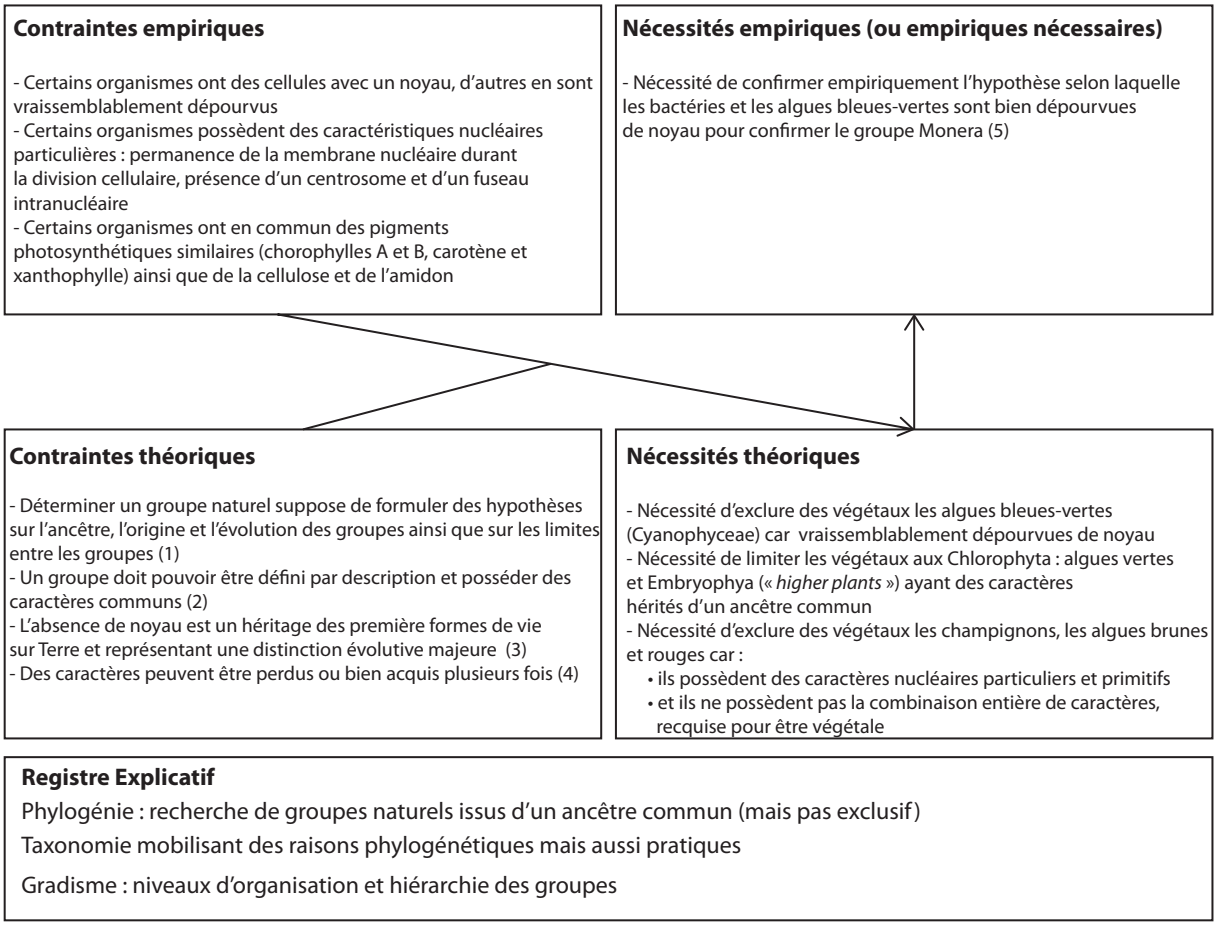


Figure 37 : modélisation de la problématisation réalisée par H. F. Copeland et fondant sa classification, en focalisant principalement l'analyse sur les végétaux

1. « The formulation of a system of classification, then, involves a double set of hypotheses: **hypotheses as to the ancestry, origin, and evolution of groups**, and hypotheses as to **what boundaries will be found expedient** » (Ibid., p. 383-384), *c'est nous qui soulignons.*

2. « In practice, a group is held to be natural if each of its members is bound to the **others by the whole range of its characters**, of which some may be **common to the whole group**, while those in which there is variation exhibit intergradation » (Ibid., p. 409), *c'est nous qui soulignons.*

3. « The Monera are here treated as a kingdom on the basis of two assumptions: that they are the comparatively **little modified descendants of whatever single form of life first appeared on earth**, and that they are sharply distinguished from other organisms **by the absence of nuclei** » (Ibid., p. 386), *c'est nous qui soulignons.*

> « As the Protista are separated from Monera by a **broad evolutionary gap**, it is easy to distinguish them from Monera by a character, namely, **the presence of nuclei** » (Ibid., p. 409)*, c'est nous qui soulignons.*

> 4. « Some of these characters **appear to some extent among Protista**. The plastids of Heterokontae, chloromonads, and euglenids can scarcely be called anything but chloroplasts, though they may differ from those of proper plants in the relative abundance of the different pigments. (…) But no organisms except proper plants show **the complete combination of plant characters** » (Ibid., p. 412) « **All these characters fade out in the evolution of various lines**: we find the nuclear membrane disappearing at earlier and earlier stages in brown algae and in Fungi; the centrosome, permanent in the lowest brown algae, is present only during mitosis in the higher brown algae; is absent during the second division of the reduction process in Polysiphonia; has not been detected in many Basidiomycetes. The spindle originates in the cytoplasm of the sporozoan Monocystis. And, while the characters of typical Protista are absent from the higher Protista, they are to some extent present, as would be expected, in the lowest plants and animals » (Ibid., p. 409)*, c'est nous qui soulignons.*

L'idée que des caractères peuvent être secondairement perdus se trouve clairement exprimée par Copeland dans son article publié en 1947.

> « Evolution can erase what it has created, and it is proper to classify as members of a group organisms which have by degeneration lost its formal positive characters » (Copeland, 1947, p. 343).

> 5. « The hypothesis that bacteria and blue-green algae are without nuclei (**and if this hypothesis is false, the name Monera is inappropriate**) involves two ideas; one is morphological; the other is a matter of words, and concerns the proper use of the term nucleus. (…) In the following survey of the groups of Monera, I shall refer to what is known of the structure of the cells. I must leave it to the judgment of each reader whether any of the structures encountered is to be considered a nucleus » (Ibid., P. 387), *c'est nous qui soulignons.*

Nous avons identifié des nécessités sur les modèles explicatifs (nécessités théoriques), mais également des empiriques nécessaires. Ce type de nécessités, proposé par Y. Lhoste, permet de « rendre compte des relations entre la construction d'un problème et de sa résolution par la mise en œuvre de tests empiriques. » (2008, p. 420).

En effet, Copeland écrit que l'absence de noyau chez les bactéries et les algues bleues-vertes n'est pas encore totalement confirmée : il parle d'une hypothèse (cf. citation n°5 ci-dessus). En effet, à cette époque, les techniques de microscopie[64] (de type optique) ne permettent pas une étude précise des ultrastructures intracellulaires au sein des Monera. La problématisation

[64] Le premier microscope électronique à transmission fut construit en 1938 à l'université de Toronto (Canada) et le premier qui fut commercialisé a été produit par Siemens en 1939.

élaborée par Copeland rend nécessaire de nouvelles observations empiriques sur le noyau des Monera pour permettre la validation de l'existence de ce quatrième règne du vivant.

- **Évolution de la nomenclature des règnes en 1947**

En 1947, Copeland publie un article (*Progress report on basic classification*) qui entend résoudre des problèmes de nomenclature de son précédent système. Il souhaite alors modifier les termes « Monera » et « Protista ». En effet, le premier résulte de E. Haeckel qui l'avait pour modèle en 1866 *Protoamoeba* et qui s'est révélé n'être que le fragment d'une amibe (1947, p. 350). Il a choisi de le remplacer par le terme « Mychota », proposé par G. Enderlein en 1925. Concernant le règne Protista, il décide sa substitution par celui de Protoctista, que J. Hogg avait utilisé en 1860. Copeland considére important d'appliquer en taxonomie la règle d'antériorité en donnant la priorité aux noms accordés précédemment. Il n'a cependant pas choisi le terme « Protozoa » de R. Owen, car ce dernier avait tout d'abord été utilisé comme une classe par Goldfuss.

Dans son ouvrage publié en 1856, Copeland reconnu que le règne Protoctista formait un assemblage indéniablement hétérogène mais il se distinguait cependant des animaux et des végétaux par son absence de caractéristiques spécifiques[65].

En conclusion, H. F. Copeland fut le premier à proposer un système à quatre règnes en choisissant comme premier critère l'organisation cellulaire (présence d'un noyau). Cependant, le règne Monera qu'il propose n'a été reconnu, au cours des années 1940, que par peu de microbiologistes car le concept de bactérie manquait encore d'une définition partagée (Sapp, 2009, p. 84). Par exemple, A. Prévot propose, en 1940, un règne bactérien mais qui ne comprenait pas les « algues bleues-vertes » (cyanobactéries). Beaucoup de microbiologistes considéraient alors les bactéries comme des champignons unicellulaires se reproduisant uniquement par fission (Henrici, 1939, cité par Sapp, 2009). Le développement de la génétique bactérienne et de la microscopie électronique renforcera l'existence de ce règne des Monera (organismes bactériens dépourvus de noyau ou « Procaryotes »). L'unité de ce règne sera cependant remise en cause dans les années 1970 avec la proposition d'une troisième forme de vie, les Archaebacteria, remettant en cause la dualité Eucaryotes/Procaryotes. Nous aurons l'occasion d'y revenir.

De plus, son système a fortement réduit l'extension du règne végétal aux seuls Chlorophyta qui regroupent les algues vertes et les Embryophytes possédant une grande similitude

[65] Scamardella (1999, p. 212)

biochimique : pigments photosynthétiques, cellulose et amidon. Copeland l'interprète comme le signe d'une étroite parenté. Outre les champignons, il exclut également des végétaux les algues rouges et brunes regroupées au sein du groupe pour le moins hétérogène des Protista, rebaptisé Protoctista en 1947. Ainsi le règne végétal diffère fortement entre les classifications de Haeckel et de Copeland.

Abordons à présent la mise en place du fameux système développé par Robert Harding Whittaker dans les années 1950-1960, attaché à l'importance des modes de nutrition et de leur conséquence écologique pour classer les êtres vivants.

2.2. Le problème de l'importance accordée aux modes de nutrition : un cinquième règne du vivant

Nous présenterons tout d'abord la genèse de l'idée de R. H. Whittaker en 1957 puis son évolution en 1959 et en 1969, année qui consacrera le système à cinq règnes dans la revue *Science*, classification qui sera discutée par Lynn Margulis en 1971, donnant lieu à un article commun par les deux biologistes en 1978.

2.2.1. La genèse de la classification de Whittaker en 1957

Robert Harding Whittaker (1920-1980) fut un spécialiste américain reconnu en écologie des communautés végétales. Élu à l'Académie nationale des Sciences des États-Unis en 1974, ses travaux lui vaudront la reconnaissance « *Eminent Ecologist Award* » accordée par la société américaine d'écologie ESF (*Ecological Society of America*) peu avant sa mort à l'âge de 59 ans. Il acheva sa carrière à Cornell University (Ithaca, NY). Outre l'écologie, Whittaker s'est intéressé à la macrotaxonomie. Il proposa une classification à cinq règnes consacrant la séparation des champignons des végétaux sur des fondements écologiques et évolutifs. Nous présenterons la genèse de son système classificatoire en 1957 et son évolution jusqu'en 1978.

En 1957, R. H. Whittaker publie un article intitulé *The kingdoms of the living world* dans la revue Ecology. Il s'agit d'une note succincte de deux pages présentant de façon claire la double ambition évolutive et écologique qu'il assigne à la classification du vivant dont il présente ici les prémisses. Sa proposition évoque une inspiration écologique très nette.

Whittaker se positionne par opposition à la fois au traditionnel système à deux règnes centrés sur les plantes 'supérieures' et les animaux 'supérieurs', et à la proposition de Copeland, dont le quatrième règne, Protista puis Protoctista, règne jugé hétérogène sur le plan évolutif[66].

[66] « The two-kingdom conception may result largely from the circumstance that the organisms most obvious to man in the world about him are of two major types-higher plants and higher animals. A classification based on

Whittaker rappelle l'existence d'une classification écologique distinguant trois rôles fonctionnels dans les communautés associés à trois modes de nutrition : les producteurs se nourrissant par photosynthèse (végétaux), les consommateurs par ingestion (animaux) et les décomposeurs par absorption (champignons et bactéries). Il considère que ces trois classes écologiques correspondent à des tendances ou des directions évolutives. À ces distinctions écologiques fondant des directions évolutives seraient corrélées des caractéristiques cytologiques et biochimiques.

Par rapport au débat sur le caractère « réel » ou construit de la classification, Whittaker avance que la classification est une construction humaine basée sur des critères choisis et que les règnes reposent principalement sur des directions évolutives.

> « The kingdoms are **man's classification**, the largest groupings he chooses to recognize by chosen criteria, within the living world. It is suggested that the **kingdoms are, most essentially, major directions of evolution.** And, if they are so regarded, there is much to be said in favor of a conception based on **three directions of evolution - plants, animals, and saprobes - related to three major means of nutrition-photosynthesis, ingestion, and absorption - and three major roles in natural communities - as producers, consumers, and reducers** » (Ibid., p. 536-537), *c'est nous qui soulignons.*

D'un point de vue écologique, Whittaker regroupe les bactéries et les champignons au sein des saprobes. Mais il reconnaît que, sur un plan évolutif, ce regroupement est problématique[67].

Ainsi, Whittaker propose parmi les organismes multicellulaires ou multinucléés une distinction de trois règnes, basés sur les trois directions évolutives qui reposent sur les modes de nutrition associés aux rôles écologiques leur permettant de jouer dans les écosystèmes : *Plantae, Animalia* et *Fungi*.

Joël B. Hagen (1996, p. 15) représente ces trois règnes dans la figure reproduite ci-dessous.

fitting all other organisms into two kingdoms suggested by these is likely not to represent the best possible view of the evolutionary and ecological pattern of the living world. (…) The kingdom Protoctista seems more a product of taxonomic definitions than a grouping of organisms with coherent meaning or common evolutionary theme » (Whittaker, 1957, p. 536).

[67] « A principal difficulty is in the treatment of the bacteria; for a grouping together of bacteria and fungi as a kingdom of saprobes is **less convincing on evolutionary grounds** than other assignments of unicellular forms. » (Ibid., p. 537), *c'est nous qui soulignons.*

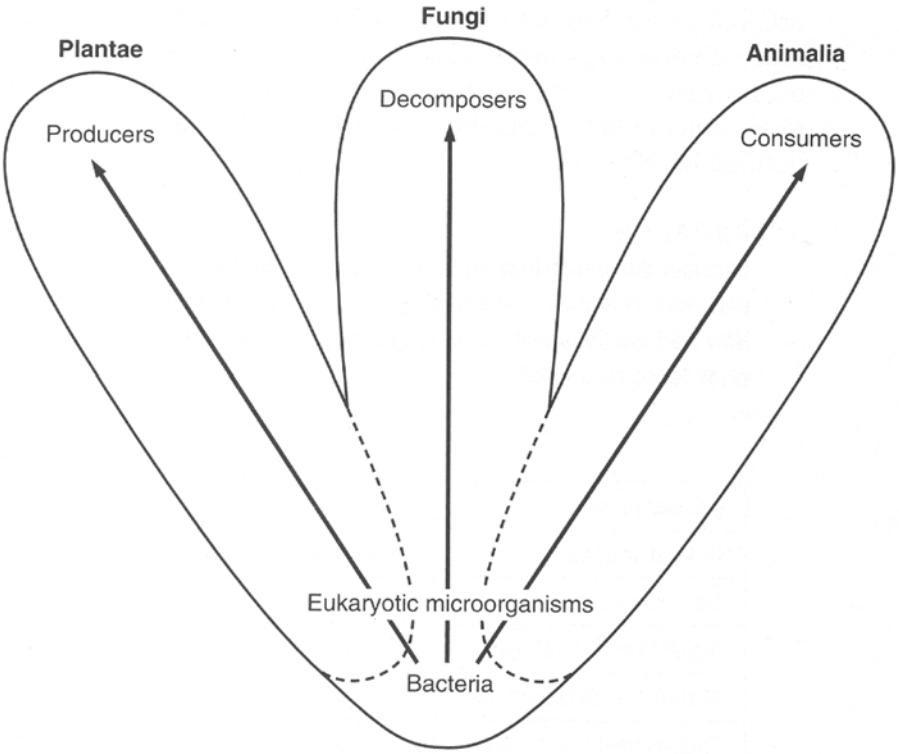


Figure 38 : Représentation des trois règnes de Whittaker reposant sur trois rôles écologiques. Reproduit de Hagen, 1996, p. 15.

Nous synthétisons, en figure 39, l'analyse de l'article de Whittaker (1957) de manière à comprendre comment il construit la nécessité de distinguer les champignons des végétaux sur des fondements écologiques et évolutifs.

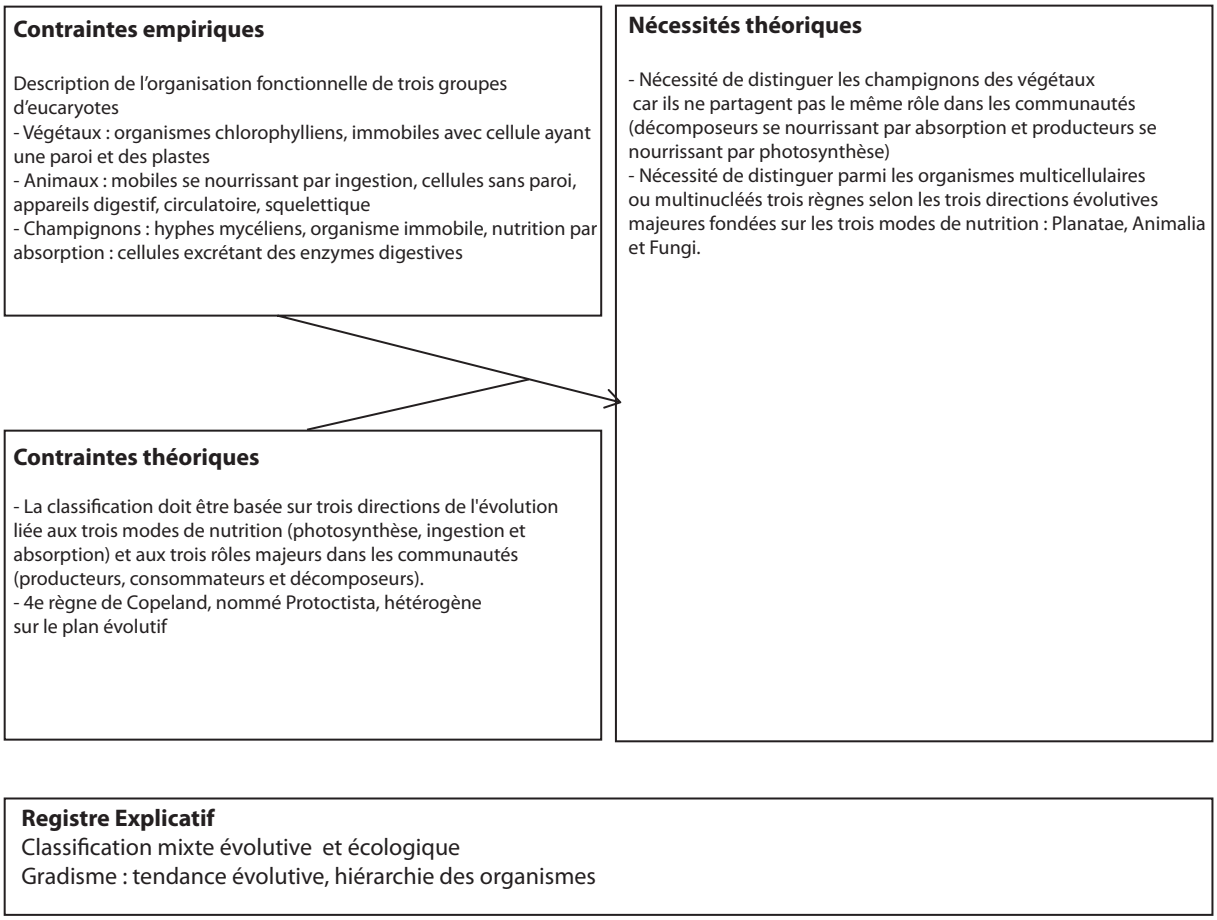


Figure 39 : modélisation de la problématisation développée par R. H. Whittaker (1957) pour expliquer la nécessité de distinguer les végétaux des champignons

2.2.2. La classification à quatre règnes en 1959

Deux ans après cette publication de 1957 où il annonce le germe de sa classification, Whittaker raffine celle-ci en proposant à un système à quatre règnes représenté en figure 40.

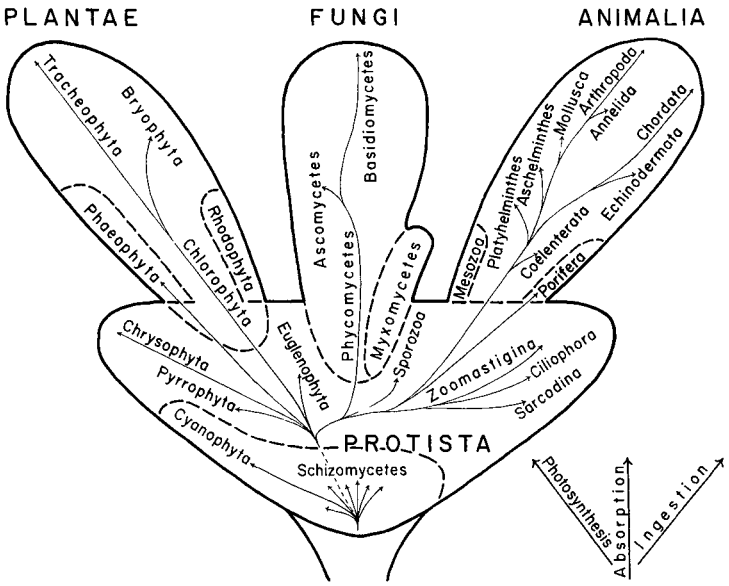


FIG. 2. A SCHEMATIC VIEW OF THE KINGDOMS AND PHYLA ACCORDING TO THE VIEW PRESENTED HERE, WITH EVOLUTIONARY RELATIONS SUGGESTED IN A SIMPLIFIED FORM

Many of the animal phyla are omitted. No derivation is indicated for the Rhodophyta, Myxomycetes, and Mesozoa, and none is implied by the positions of the Euglenophyta and Sporozoa near these groups.

Figure 40 : représentation du système à quatre règnes de Whittaker (1959, p. 217)

Outre les trois règnes d'organismes multicellulaires ou multinucléés distingués par leur mode de nutrition, Whittaker ajoute un quatrième règne : Protista, regroupant ainsi les organismes unicellulaires. Hagen (1996, p. 16) explique que Whittaker s'est immergé dans la classification des unicellulaires, qu'il connaissait mal.

Dans son article de 1959, Whittaker identifie trois niveaux d'organisation : les organismes anucléés (Monera), les organismes unicellulaires nucléés (Eunucleata) et les organismes multicellulaires ou multinucléés[68].

Sa classification combine donc des critères éclectiques, de type fonctionnel (nutrition et rôles écologiques) et de type organisationnel, dont il pense qu'ils reflètent les grandes directions de l'évolution.

Dans cet article, Whittaker explicite les caractéristiques d'une classification naturelle, qu'il nous semble important de souligner afin de comprendre les fondements théoriques et méthodologiques de son travail. Il place comme premier critère d'une classification naturelle le fait que les groupes soient cohérents, clairement définis et délimités grâce à quelques caractères clés. De plus, la classification doit être fondée sur des relations évolutives. Les

[68] « It is consequently appropriate to conceive the broad relations of the living world in terms of three modes of nutrition and directions of evolution rather than two – the photosynthetic of the green plants, the ingestive of the animals, and the absorptive of the bacteria and fungi. These three directions of evolution appear on **three major levels of organization** - the **Monera**, or bacteria and blue-greenalgae, which lack nuclear membranes; the **Eunucleata**, or unicellular organisms with nuclear membranes; and the **multicellular and multinucleate higher plants, animals, and fungi** » (Whittaker, 1959, p. 210).

groupes polyphylétiques doivent être évités mais pas nécessairement exclus de façon absolue[69].

Whittaker a parfaitement conscience que les règnes qu'il propose sont polyphylétiques. En effet, il privilégie le regroupement suivant le partage d'un maximum de caractères au détriment d'une étroite relation évolutive.

> « While the resulting **kingdoms are polyphyletic** products of parallel evolution, this design of the classification as a whole has been preferred to the alternatives—the creation of minor kingdoms and the merger of widely divergent minor stems into the Protoctista [*Copeland*] » (Ibid., p. 222), *c'est nous qui soulignons.*

Dans ce système à quatre règnes, les Monera et les Eucaryotes unicellulaires forment deux sous-règnes (*subkingdoms*) au sein des Protista. Ce point fera l'objet de la révision opérée par Whittaker en 1969.

2.2.3. La classification à cinq règnes en 1969

Dix ans plus tard, en 1969, R. H. Whittaker propose une version rectifiée de son système classificatoire dans un article intitulé *New concepts of kingdoms of organisms*. En publiant dans la prestigieuse revue *Science*, il s'assure une large diffusion de ses idées. Cet article constitue une référence[70]. Par rapport à la classification de 1959, Whittaker a fait évoluer son système classificatoire en séparant les bactéries, formant un cinquième règne, nommé Monera à la suite de Copeland. Ainsi, le groupe des Protista rassemble les Eucaryotes unicellulaires uniquement. La distinction entre Procaryotes et Eucaryotes apparaît dorénavant comme la séparation la plus claire au sein du monde vivant (Whittaker, 1969, p. 151).

Cette nouvelle position de Whittaker est à mettre en relation avec les travaux des microbiologistes dans les années 1960, notamment ceux de Roger Y. Stanier sur le concept de bactérie et le monde microbien, des chercheurs qui soutiennent cette distinction

[69] « The various systems may be judged by their relative success in expressing those broad relationships which seem most important, and in achieving that which biologists imply by a "natural" classification. Natural classifications have several, interrelated characteristics which may perhaps be formulated: (1) **Taxa should be internally coherent**, and subject to **clear definition and delimitation**. They should be based on consideration of a maximum number of characteristics, though **a few "key" characters** may be chosen for **practical definition**. So far as possible natural continuities or intergradations should be taken advantage of to unify, and natural discontinuities to separate, taxa. (2) **Evolutionary unity**, **of common descent**, should underlie the coherence of the taxa. **Polyphyletic derivation of the organisms in a taxon is avoided** when it can be recognized; but **it is not necessarily excluded**, especially in cases of parallel rather than convergent evolution. (3) The design of the classification as a whole should embody our **understanding of major relations among organisms**; it should organize the information about these organisms and summarize this knowledge in the way best comprehended. (4) In the number, arrangement, and ranking of taxa, the design should express (or should be generally consistent with) **our current understanding of evolutionary relations** » (Ibid., p. 222), *c'est nous qui soulignons.*

[70] Nombre de citations en novembre 2015. Article de Whittaker (1969) dans *Science* : Scopus (Elsevier) : 264 / WOS (Thomson Reuters) : 372 / Google Scholar : 775 citations. En comparaison, l'article de Whittaker (1957) dans *Ecology* : Scopus : - / WOS : 11 / Scholar : 23

d'organisation cellulaire retenue dans la classification à cinq règnes. Il est intéressant de noter que Whittaker se réfère à la théorie endosymbiotique pour expliquer cette différence d'organisation cellulaire, faisant des chloroplastes et des mitochondries d'anciennes bactéries symbiotiques. Avancée en 1968 par Lynn Margulis (1938-2011), l'idée d'une origine symbiotique du chloroplaste n'est cependant pas nouvelle (Schimper, 1883 ; Merezhkowsky, 1910, cités par Sapp, 2009, p. 116). Mais le nom de Lynn Margulis[71] reste associé à la théorie symbiotique de l'évolution comme celui de Charles Darwin l'est pour la théorie de l'évolution (Sapp, 2012, p. 54). Whittaker mentionne une origine cyanobactérienne des chloroplastes dans son article (p. 151). La figure 41 présente le système à cinq règnes tel que proposé par l'auteur.

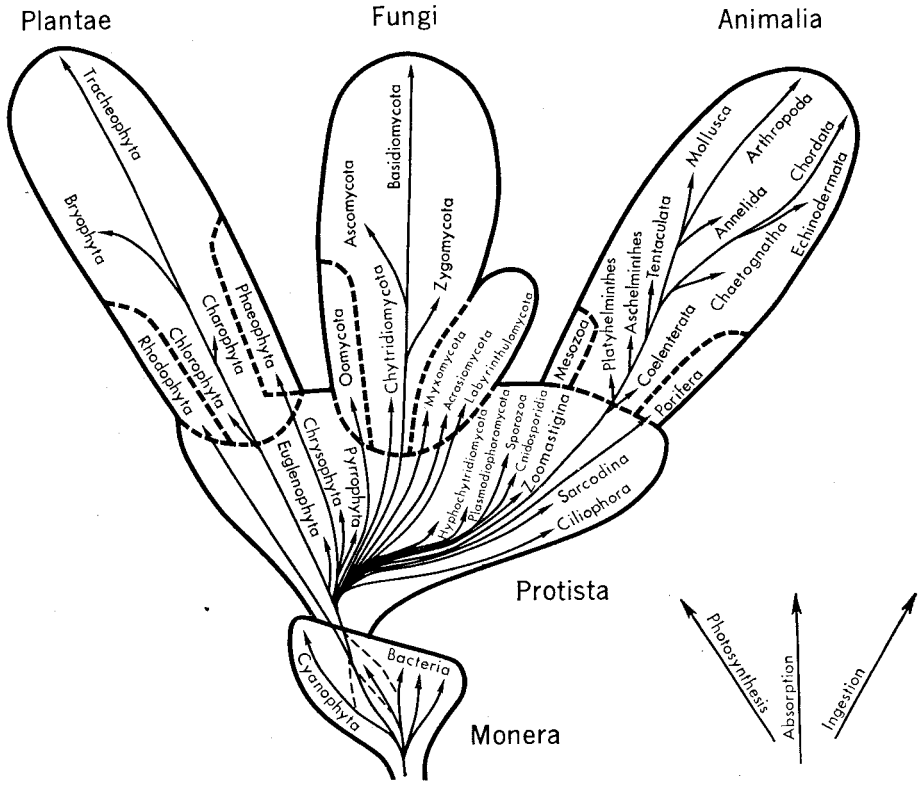


Fig. 3. A five-kingdom system based on three levels of organization—the procaryotic (kingdom Monera), eucaryotic unicellular (kingdom Protista), and eucaryotic multicellular and multinucleate. On each level there is divergence in relation to three principal modes of nutrition—the photosynthetic, absorptive, and ingestive. Ingestive nutrition is lacking in the Monera; and the three modes are continuous along numerous evolutionary lines in the Protista; but on the multicellular–multinucleate level the nutritive modes lead to the widely different kinds of organization which characterize the three higher kingdoms—Plantae, Fungi, and Animalia. Evolutionary relations are much simplified, particularly in the Protista. Phyla are those of Table 1; but only major animal phyla are entered, and phyla of the bacteria are omitted. The Coelenterata comprise the Cnidaria and Ctenophora; the Tentaculata comprise the Bryozoa, Brachiopoda, and Phoronida, and in some treatments the Entoprocta.

Figure 41 : représentation du système à cinq règnes de Whittaker (1969, p. 157)

[71] Lynn Margulis est une prestigieuse biologiste : elle est entrée à la *National Academy of Sciences* des États Unis en 1983 et reçut de nombreux prix dont la *National Medal of Science* en 1999.

Ce schéma fait clairement apparaître les trois directions évolutives représentées par les trois flèches figurant les trois modes de nutrition, constituant son critère écologique majeur, qu'il combine avec le critère d'organisation cellulaire représenté par les trois niveaux du plan vertical. Ainsi apparaissent, de haut en bas : l'organisation procaryotique en bas (Monera), puis au milieu l'organisation eucaryotique unicellulaire (Protista), enfin, en haut, l'organisation eucaryotique multicellulaire ou multinucléée. L'ordre de représentation est à mettre en parallèle avec l'utilisation d'expressions comme « organismes inférieurs et supérieurs » (*lower and higher organisms*), traduisant sa conception gradiste de l'évolution.

La figure 42 modélise la problématisation mise en œuvre par R. H. Whittaker afin d'expliquer la nécessité de distinguer cinq règnes du vivant dont un règne végétal. De nombreux arguments jouant le rôle de contraintes empiriques et théoriques sont repris de l'article paru en 1959.

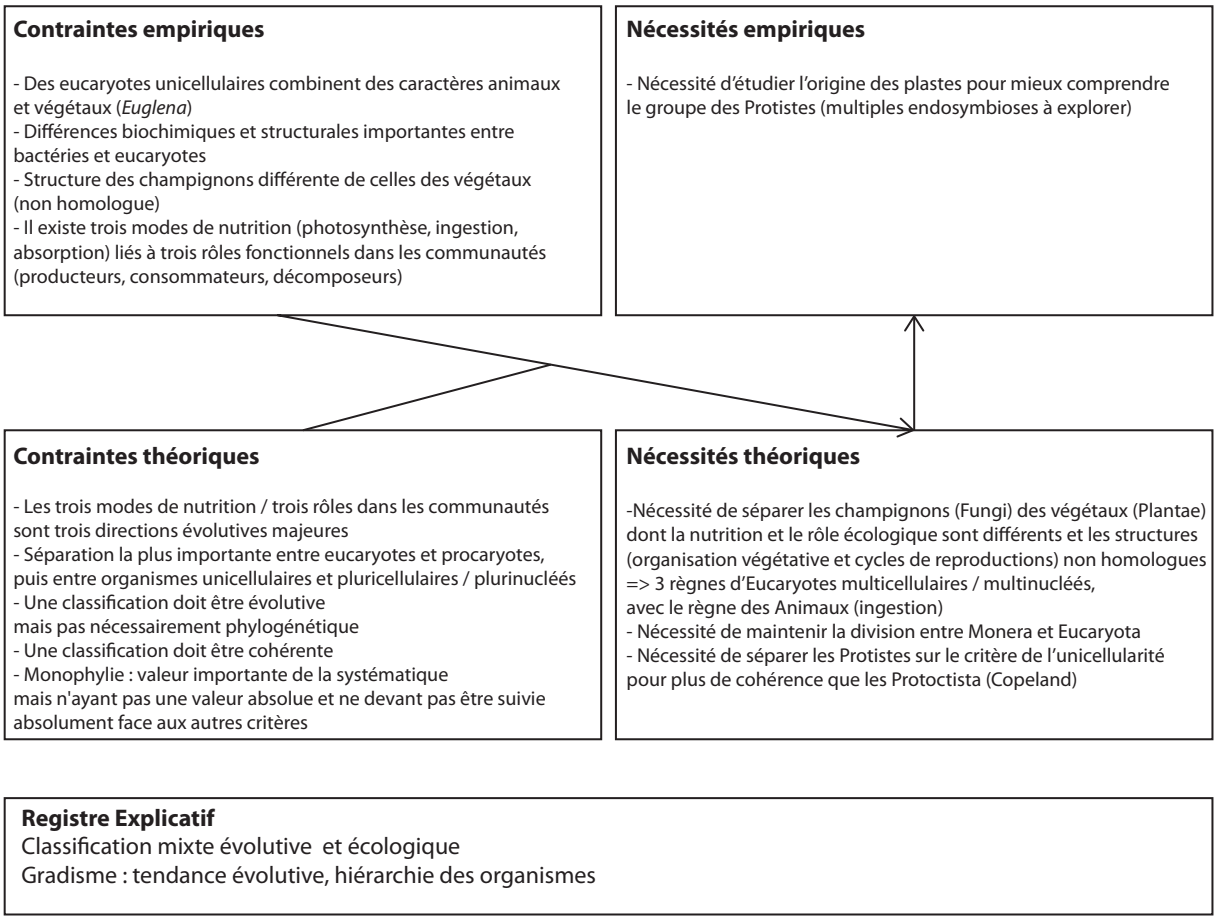


Figure 42 : modélisation de la problématisation développée par R.H. Whittaker (1969) pour expliquer la nécessité de distinguer cinq règnes du vivant dont un règne végétal (Plantae)

Comme dans sa version antérieure, R.H. Whittaker poursuit à nouveau un double objectif : écologique et évolutif. Il mobilise des caractéristiques fonctionnelles dans sa classification, le

mode de nutrition qu'il met en relation avec les rôles écologiques au sein des cycles de la matière[72]. Sa classification possède également une ambition évolutive comme en atteste les propos suivants :

> « **Evolutionary relations** are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. » (Ibid., p.150), *c'est nous qui soulignons.*
>
> « The three modes of nutrition imply different logics on which **the evolution** of structure in higher organisms was based. » (Ibid., p. 152), *c'est nous qui soulignons.*
>
> « I believe that this system better represents **broad relationships in regard to both levels of organization and nutritive modes affecting kinds of organization** than the two-kingdom and Copeland systems. » (Ibid., p. 157), *c'est nous qui soulignons.*

Pour autant, dans la partie *Limitations of the Five-Kingdom* System, Whittaker explique qu'il a eu conscience de ne pas construire une classification phylogénétique et de constituer des groupes polyphylétiques. Déjà en 1959, il explique l'importance de réaliser des compromis entre des lignées monophylétiques et un système taxonomique pratique, clair, cohérent avec des groupes facilement définissables. Dans ce nouvel article, il formule clairement sa position selon laquelle la monophylie des groupes reste une valeur taxonomique importante mais qui ne doit pas être suivie de façon absolue au détriment des autres objectifs d'une classification. Il constitue des groupes polyphylétiques qui, selon lui, traduisent une même direction évolutive. Là encore apparaît sa conception gradiste qui accorde aux grades une valeur taxonomique.

> « **Monophyly is a principal value of systematics**, but like other values is **not absolute** and will not always be followed to **the sacrifice of other objectives**. I have chosen to base classification on three levels of organization - the procaryotic, eucaryotic unicellular, and multicellular-multinucleate and three principal directions of evolution related to nutrition, which on the multicellular-multinucleate level are expressed in the **evolutionary divergences** of the three higher kingdoms. The three higher kingdoms are **polyphyletic** in parallel fashions. Each includes a **dominant evolutionary line to higher organisms** as its major subkingdom, and minor subkingdoms which are independent experiments in multicellular or multinucleate organization in one of the three nutritive directions. » (Whittaker, 1969, p. 158), *c'est nous qui soulignons.*
>
> **« The three higher kingdoms are polyphyletic.** Phaeophyta are recognized to have come from different unicellular ancestors than the Chlorophyta; the resemblance of these three groups as higher plants results from convergence. » (Ibid., p. 157), *c'est nous qui soulignons.*

[72] « There are, however, not two principal modes of nutrition but three - the photosynthetic, absorptive, and ingestive. The three modes largely correspond to three major functional groupings in natural communities, the producers (plants), reducers (saprobes, that is, bacteria and fungi), and consumers (animals) » (Whittaker, 1969, p. 152).

Bien qu'il utilise le terme de règne dans tout son article, il reconnaît que les végétaux forment une alliance de groupes séparés mais qui partageaient la multicellularité et la photosynthèse de façon prédominante. Il avance en effet que les algues rouges (Rhodophyta) et les algues brunes (Phaeophyta) émergèrent d'ancêtres unicellulaires différents des algues vertes (Chlorophyta)[73].

Ainsi, le projet de classification de R. H. Whittaker est qualifié par Joël B. Hagen (2012, p. 70) de largement évolutionniste bien que non nécessairement phylogénétique[74]. Sa vision de la classification était partagée par de nombreux biologistes, avant le développement de la cladistique qui eut lieu à partir des années 1970.

G. Lecointre (2009a, p. 320) qualifie de « systématique éclectique » cette façon de classer qui accorde de l'importance aux « affinités évolutives », aux « sauts adaptatifs » et au « degré de complexité réalisés par des taxons entiers appelés "grades" ». Le terme « éclectique » semble particulièrement approprié dans le cas du système de Whittaker qui ne se base pas seulement sur des critères structuraux traduisant des degrés d'organisation, mais également sur des critères fonctionnels liés aux modes de vie (nutrition) et aux rôles écologiques des groupes. Comme Whittaker l'expliquait en 1959, une classification doit reposer sur des groupes facilement définissables grâce à quelques caractères clés. Dans cet article, il définit donc chacun des cinq règnes. Le règne végétal est décrit ainsi :

> « Kingdom Plantae : Multicellular organisms with walled and frequently vacuolate eucaryotic cells and with photosynthetic pigments in plastids (together with closely related organisms which lack the pigments or are unicellular or syncytial). Principal nutritive mode photosynthesis, but a number of lines have become absorptive. Primarily nonmotile, living anchored to a substrate. Structural differentiation leading toward organs of photosynthesis, anchorage, and support, and in higher forms toward specialized photosynthetic, vascular, and covering tissues. Reproduction primarily sexual with cycles of alternating haploid and diploid generations, the former being progressively reduced toward the higher members of the kingdom. » (Ibid., p. 154).

Il combine des caractères morphologiques (organismes multicellulaires, fixés au substrat), avec des caractères cellulaires (cellule avec une paroi, des plastes avec des pigments photosynthétiques et souvent une vacuole) et des caractères fonctionnels (nutrition par

[73] « Judged by the criterion of monophyly, the Plantae as treated here may seem less a kingdom than an alliance of separate groups which are multicellular and predominantly photosynthetic. » (Ibid., p. 157).

[74] « Whittaker argued for a classification system that was **broadly evolutionary, although not necessarily phylogenetic**. Phylogenetic relationships were important but, according to Whittaker, monophyletic grouping needed to be balanced with other important criteria, such as ecological function and cellular organization. In addition, Whittaker resisted a purely phylogenetic basis for classification because he considered many of the phylogenetic claims made by Copeland and other taxonomists to be highly speculative. Before the widespread acceptance of cladistics, which did not occur until the 1970s, **Whittaker's views on phylogeny were held by many biologists**. » (Ibid., p. 70), *c'est nous qui soulignons.*

photosynthèse, reproduction sexuée avec alternance de générations haploïde et diploïde, absence primaire de mobilité). Des évolutions secondaires au sein du groupe sont envisagées dans sa définition, comme la perte de photosynthèse et l'acquisition d'une nutrition par absorption.

Contrairement à Copeland qui restreignait les végétaux aux seuls Chlorophyta, Whittaker inclut l'ensemble des lignées photosynthétiques multicellulaires : algues pluricellulaires et plantes terrestres, qu'il nomme Metaphyta (p. 163, en citant Haeckel).

À la fin de son article, Whittaker ouvre sur la nécessité d'études ultérieures concernant les protistes pour lesquels il est envisagé la possibilité d'acquisition indépendantes d'algues symbiotiques à l'origine des plastes[75], en référence aux travaux de Lynn Margulis en 1967 (sous son précédent nom Sagan) et en 1968.

Dans notre modélisation de la problématisation, nous accordons le statut d'empirique nécessaire à la nécessité formulée par Whittaker de nouvelles recherches dans le but d'apporter des données relatives à la théorie endosymbiotique, encore controversée, pour comprendre l'origine des plastes et examiner la monophylie du groupe des protistes.

En conclusion, le système de Whittaker (1969) à cinq règnes, sépare les Fungi des Plantae, les premiers se nourrissant par absorption, les seconds par photosynthèse. Outre le critère d'organisation, le mode de nutrition devient alors essentiel pour classer les Eucaryotes et reflète l'importance de la dimension fonctionnelle de sa classification qu'il considère être le reflet de grandes directions évolutives. Une conséquence fondamentale de ce système à cinq règnes est donc la sortie des champignons du groupe des végétaux alors qu'institutionnellement la mycologie a toujours été très liée à la botanique. Cette classification a été très marquante et la division des Eucaryotes en trois règnes reste très souvent utilisée.

Avec le développement de la théorie endosymbiotique (1968, 1970; 1967), la compréhension de l'histoire du règne Plantae va dès lors prendre en compte l'histoire des plastes. Comment le système de Whittaker a-t-il évolué par la suite ?

[75] « The protists as a kingdom have seemed monophyletic; but the implications, of possible independent acquisition of symbiotic algae which became chloroplasts, if this process is accepted, for origin of the kingdom and its phyla are still to be explored » (Ibid., p. 158).

2.2.4. Les modifications du système à cinq règnes par Margulis et Whittaker

- **Les modifications proposées par L. Margulis (1971)**

En 1971, après la publication du système à cinq règnes, Lynn Margulis modifie la classification à quatre règnes qu'elle avait proposé en 1968 pour intégrer le cinquième règne Fungi proposé par Whittaker. Elle reprit en 1971 le nom des Protista pour remplacer le règne Protoctista qu'elle avait utilisé auparavant, suite à Copeland. Cependant, une différence majeure entre la classification de Whittaker (1969) et de Margulis (1971) réside dans la délimitation des deux règnes Plantae et Protoctista. Si pour Whittaker les végétaux désignent l'ensemble des Eucaryotes multicellulaires photosynthétiques, Margulis les restreint aux seules plantes terrestres qu'elle désigne par le nom Metaphyta (et non Embryophyta). Margulis pense que les trois règnes majeurs Plantae, Animalia et Fungi seraient alors probablement monophylétiques, mais elle a conscience que pour cela elle fait du règne Protista un groupe hétérogène et polyphylétique issu de différents ancêtres[76].

Mais pour Margulis, cette réorganisation du règne des Eucaryotes « inférieurs » résout les difficultés posées par le système de Whittaker en faisant des protistes le groupe ancestral des trois règnes « supérieurs »[77].

La figure 43 représente le système classificatoire à cinq règnes de Lynn Margulis (1971).

[76] These heterogeneous protists represent polyphyletic evolutionary "experiments" leading toward the ultimate establishment of mitosis and regular meiosis. Presumably the three major (probably) monophyletic and regularly sexual kingdoms (green plant; eumetazoan animal; amastigote true fungi) evolved independently from eukaryotic protist ancestors » (Ibid., p. 243), *c'est nous qui soulignons.*

[77] « This reorganization of Whittaker's lower eukaryotes simultaneously solves the difficulties he notes in defining the Protist Kingdom. **It is ancestral to the three higher kingdoms**, comprising eukaryotes that branched from each other in the origin of mitotic-meiotic sexuality » (Ibid., p. 245), *c'est nous qui soulignons.*

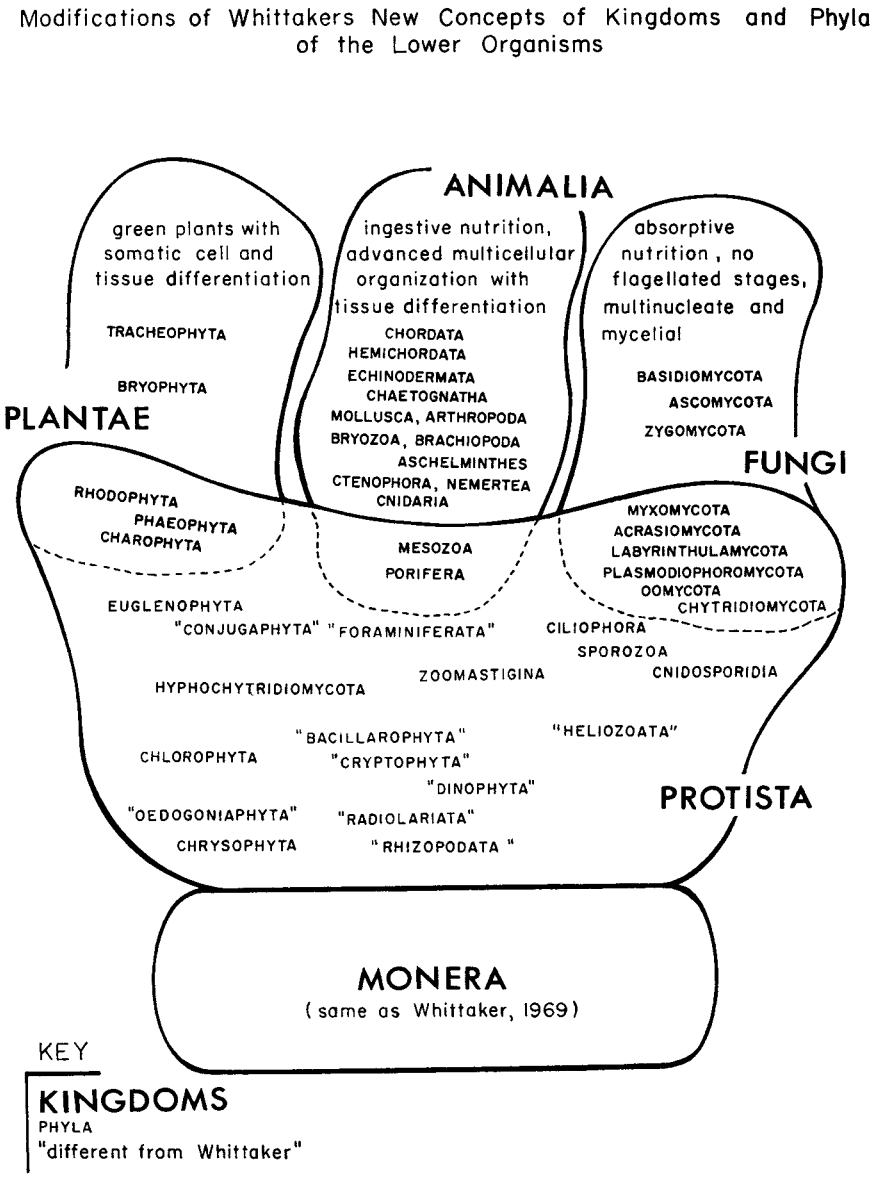


FIG. 2. Modifications of Whittaker's (1969, his Fig. 3) Five Kingdom Scheme based on protist phylogeny.

Figure 43 : classification de L. Margulis modifiant le système à cinq règnes de Whittaker (1969). Reproduit de Margulis, 1971, p. 244.

- **Un compromis entre les positions de Whittaker et Margulis (1978)**

En 1978, Whittaker et Margulis publient un article intitulé *Protist classification and the kingdoms of organisms*. Ce texte établit un compromis entre les systèmes classificatoires proposés par chacun d'eux. Les auteurs discutent principalement de la délimitation du groupe des Protista ou Protoctista (les deux termes étant utilisés dans l'article) et de façon corrélative des trois autres règnes d'Eucaryotes « supérieurs ». Whittaker et Margulis rappellent leur position théorique concernant la classification dont l'évolution est l'essence même. Ils

souhaitent éviter les groupes polyphylétiques en expliquant qu'il n'est pas complètement possible de les proscrire. Ils ont conscience que le règne des Protista (ou Protoctista pour Margulis) est polyphylétique mais ils considèrent que c'est un compromis nécessaire pour limiter la prolifération de petits groupes qu'il faudrait ériger au rang de règnes. Ils pensent que le règne végétal (au sens large) incluant les algues « supérieures » est polyphylétique alors que le règne végétal limité aux plantes terrestres (nommées Embryophyta et plus Metaphyta) serait monophylétique[78].

Dans leur tableau décrivant l'organisation taxonomique, les deux termes Protista et Protoctista sont proposés pour le règne des Eucaryotes « inférieurs » avec une définition différente pour chacun : Eucaryotes unicellulaires (solitaires ou coloniaux) pour les protistes (issus de Whittaker) et incluant également des formes multicellulaires simples pour les protoctistes (issus de Margulis).

Par un jeu de parenthèses, les deux auteurs signalent les groupes « transitionnels » pouvant figurer parmi les Protoctista ou les Plantae. Ils ont choisi de placer les algues vertes (Chlorophyta) parmi les Protista/Protoctista mais les algues rouges (Rhodophyta) et brunes (Phaeophyta) parmi les Plantae. Ils indiquent que leur proposition reste un compromis, une solution alternative parmi d'autres possibles (Ibid., p. 15). Whittaker et Margulis concluent leur article en indiquant qu'il ne s'agit nullement d'une classification définitive. Elle se veut utile en fournissant un cadre permettant de futures recherches sur l'évolution des protistes.

En conclusion, le système à cinq règnes proposé par Whittaker et révisé avec Margulis consiste en une classification répondant à un souci pratique de fournir une vision synoptique du monde vivant (Whittaker & Margulis, 1978, p. 11), fondée sur des principes écologiques et cellulaires. Sa simplicité ainsi que la renommée de ces deux scientifiques expliquent probablement une part de son succès. Cependant, cette classification n'est pas phylogénétique. Bien qu'elle valorise l'importance de la monophylie, elle comprend cependant des groupes polyphylétiques qui permettent d'éviter un trop grand nombre de règnes.

[78] « **As evolution is the essence of systematics, so polyphyletic taxa are unwelcome**. Throughout the taxonomy of organisms we seek to redefine groups in ways that **avoid recognized polyphyly**. Like most ideals, monophyly becomes relative in application, even if reluctantly so. Moreover, **strict monophyly may be increasingly difficult** to demand of all taxa as the levels of categories are ascended from species to kingdom. It is difficult to be strict about the kingdoms. We accept **multiple origin** by anastomosing cellular symbioses for the Protista or Protoctista. **The broader kingdom Plantae, including higher algae, is polyphyletic**; the narrower kingdom Plantae or Embryophyta seems more reasonably monophyletic. Some would suspect that at least the bryophytes and tracheophytes arose separately from different green algae; there is also evidence to support a monophyletic view {Pickett-Heaps, 1972, 1975). (…) The dilemma of unwelcome polyphyly vs. unwelcome proliferation of small groups applies to the protists or protoctists. » (Whittaker & Margulis, 1978, p. 6), *c'est nous qui soulignons.*

2.2.5. Le problème de la recherche de groupes monophylétiques : la fin d'un unique règne végétal

Notre étude nous a conduit aux années 1970. Durant le premier chapitre, nous avons présenté l'importance de cette période pour la systématique qui connaîtra un renouveau important avec le développement de la phénétique (ou taxonomie numérique) et de la cladistique (ou systématique phylogénétique), remettant en question la systématique évolutionniste. Nous entendons à présent à développer les enjeux de ce débat, afin de situer les classifications proposées à partir des années 1980 recherchant uniquement des groupes monophylétiques, sachant que ce terme sera compris de deux façons différentes selon les positionnements théoriques des systématiciens.

2.2.6. Le renouveau de la systématique par la remise en cause de la systématique évolutionniste

D'intenses débats conduiront à la remise en question de la systématique évolutionniste, mise en place à partir des années 1930-1940 dans le cadre de la synthèse moderne. Pascal Tassy (2003) résume les reproches formulés à l'encontre de la systématique évolutionniste. La phénétique lui reproche « de faire la part trop belle aux incertitudes des hypothèses évolutives » alors que la cladistique critique « la faiblesse de la réflexion phylogénétique ». Willi Hennig (1913-1976) est un zoologiste allemand, spécialiste des Insectes Diptères, à l'origine d'une nouvelle méthode de classification : la cladistique. Il l'énonce dans un livre paru en 1950 : *Grundzuge einer theorie der phylogenetischen systematik* (Fondements d'une théorie de la systématique phylogénétique). La diffusion large de ses idées n'a eu lieu qu'avec la traduction de son ouvrage en anglais, en 1966, intitulé *Phylogenetic systematics*, ainsi que par un article portant le même nom publié en 1965 dans le journal *Annual Review of Entomology*. L'ouvrage d'Hennig est une référence majeure comme en témoigne le nombre considérable de citations[79]. Afin que la systématique traduise les relations phylogénétiques, comme le souhaitait C. Darwin (bien qu'il parlât de relations généalogiques), Hennig propose un nouvel usage de l'homologie. Comme nous l'avions expliqué dans le chapitre 1, W. Hennig avance que seul le partage de caractère à l'état dérivé (synapomorphie) est révélateur des clades (groupes monophylétiques sensu stricto). Il exclut donc les groupes paraphylétiques basés sur le partage de caractères à l'état ancestral, excluant certains descendants d'une lignée phylogénétique. Ainsi la cladistique rejette les grades définis par la

[79] En février 2016 : 5242 citations de l'édition de 1999 du livre *Phylogenetic Systematics* sur le moteur Google Scholar, sachant que les bases Scopus et WOS ne référencent pas les livres.

systématique évolutionniste. P. Tassy (2003) explique l'essor que la cladistique a pris à partir des années 1970, notamment avec le développement d'algorithmes[80]. La cladistique s'est imposée durant les années 1980 pour tous les groupes taxonomiques, mêmes si comme nous le verrons par la suite les débats théoriques et méthodologiques avec la nouvelle systématique se sont poursuivis longtemps.

Pour Armand de Ricqlès, avec la cladistique, « on entre dans le domaine d'une méthodologie hypothético-déductive explicite qui se substitue aux opinions d'auteurs » (de Ricqlès, 1996, p. 12).

La phénétique critique également les concepts flous de la systématique évolutionniste mais pour des raisons autres que ceux de la cladistique. Des auteurs tels que Peter H. A. Sneath et Robert Sokal (1963) mettent en avant l'importance de classer selon la « ressemblance globale » qu'ils calculent mathématiquement. P. Tassy (2003) explique que « la taxinomie numérique fonda tout son prestige sur la mathématisation : calcul d'indices de ressemblance, construction de matrices de distances entre organismes, ajustement des distances sous la forme d'un arbre permettant d'identifier des *clusters*, c'est-à-dire des groupes de ressemblance. ». Les développements de l'informatique et de la biologie moléculaire durant cette période constituent des conditions de possibilité pour les avancées de la systématique de façon générale. Les méthodes de calcul phénétique de distance ont été très utilisées sur des séquences protéiques ou nucléotidiques (ADN et ARN), donnant lieu à de célèbres arbres du vivant, comme celui de Fitch & Margoliash (1967) sur l'analyse de séquences de cytochrome C.

C'est dans ce contexte d'intenses débats théoriques et méthodologiques que s'inscrit, en 1981, la nouvelle classification proposée par Tom Cavalier-Smith, que nous analyserons de façon détaillée puisqu'elle entraîne l'éclatement d'un unique règne végétal.

[80] « Si la systématique a repris sa place comme science de référence, elle le doit principalement à l'engouement pour la phylogénétique, la science des constructions d'arbres phylogénétiques. Née en Allemagne avec Hennig, la cladistique connut son essor aux États-Unis, au cours des années 1970, non seulement grâce aux concepteurs d'algorithmes comme Steve Farris, mais aussi aux travaux de systématiciens praticiens, ichtyologistes comme Gareth Nelson ou Ed Wiley, ornithologistes comme Joël Cracraft, arachnologistes comme Norman Platnick, herpétologues comme Arnold Kluge. Ces auteurs, et bien d'autres, argumentèrent énormément sur la supériorité de l'approche cladistique. Quelques articles et livres aux retombées considérables furent leur œuvre (Nelson, 1970 ; Nelson & Platnick 1981 ; Eldredge et Cracraft, 1980 ; Wiley, 1981). En Europe nombre de cladistes de la première heure (parfois animés de prosélytisme) furent entomologistes à l'instar de Hennig (Lars Brundin en Suède, Claude Dupuis et Bernard Serra Tosio en France), ichtyologistes (Colin Patterson et Roger Miles en Angleterre, Niels Bonde au Danemark, Daniel Goujet en France), ou encore paléomammalogistes (Robert Hoffstetter en France). (…) La prétention cladistique de représenter la systématique à son point culminant d'efficacité fut durablement ressentie par maints systématiciens comme une agression vis-à-vis des autres pratiques mais, sans caricaturer, on peut affirmer que durant les années 1980 la cladistique toucha presque tous les groupes taxinomiques et s'imposa donc. » (Tassy, 2003)

2.2.7. La classification de Cavalier-Smith et l'éclatement du règne végétal

- **Le système à neuf ou sept règnes eucaryotiques… ou encore six règnes du vivant (1981)**

Né en 1942, Tom Cavalier-Smith, biologiste britannique de renom, est actuellement professeur émérite à l'université d'Oxford, après dix ans au Canada (University of British Columbia). Il est lauréat de nombreux prix, dont le Prix international de Biologie en 2004. T. Cavalier-Smith a beaucoup étudié les Eucaryotes unicellulaires, les « protistes ».

En 1981, travaillant alors au King's College de Londres, il publie un article intitulé *Eukaryote kingdoms: Seven or nine?*[81]. Il élabore une nouvelle classification des Eucaryotes comportant neuf règnes qu'il propose de regrouper en sept règnes pour des raisons pédagogiques. Dans cet article, il propose un nouveau règne appelé Chromista (incluant notamment les algues brunes et les diatomées) qu'il sépare du règne Plantae restreint aux algues rouges, vertes et aux plantes terrestres. Le règne Plantae, au sens large tel que défini par Whittaker, est divisé par Cavalier-Smith en plusieurs règnes indépendants. Expliquons les fondements de ce nouveau système classificatoire, en explicitant les positions théoriques et méthodologiques de cet auteur, puis, en étudiant plus particulièrement les raisons de l'éclatement du règne végétal.

- **Positionnements théoriques et méthodologiques sur la classification**

Par rapport au vif débat sur les classifications qui a démarré durant la décade qui précède son article, comment se positionne Cavalier-Smith ?

La discussion des classifications antérieures qu'il conduit nous permet d'identifier les fondements de son propre système classificatoire. Il critique les systèmes à deux et cinq règnes, qu'ils jugent insatisfaisants d'un point de vue biologique : le premier en raison de son incapacité à prendre en compte les microorganismes ; le second en raison de la création de groupes polyphylétiques.

Pour Cavalier-Smith, la classification doit définir des groupes monophylétiques. Celui-ci avance l'idée que l'utilisation de groupes polyphylétiques est contraire aux principes taxonomiques. Pour cela, il prône l'utilisation de caractéristiques de structures cellulaires et ne pas se baser sur des caractéristiques fonctionnelles de nutrition.

> « The primary taxa of eukaryote classification **should be monophyletic** and based on fundamental cell structure rather than nutritional adaptive zones. » (Ibid., p. 461), *c'est nous qui soulignons.*

[81] Nombre de citations dans les bases de l'article Cavalier-Smith (1981), en novembre 2015 : Scopus (Elsevier) : 185 / WoS (Thomson Reuters) : 225 / Google Scholar : 332.

> « The use of nutritional adaptive zones as the basic criterion (Whittaker, 1969, 1977) leads to a system where kingdoms are polyphyletic and organisms are not grouped together on the basis of relatedness, **which is contrary to the established principles of taxonomy**. » (Ibid., p.462), *c'est nous qui soulignons.*

Si Cavalier-Smith revendique un objectif phylogénétique pour sa classification, refusant les groupes polyphylétiques, comment se positionne-t-il par rapport à la cladistique (ou systématique phylogénétique) ? Il ne fait aucunement référence à Hennig. Les termes de clade, de synapomorphie ou d'états de caractères n'apparaissent pas. Il ne discute pas non plus de paraphylie afin de la distinguer de la monophylie (s.s.).

Quel usage fait-il de l'homologie ? Il compare des caractéristiques structurales (e.g. morphologie des crêtes mitochondriales, type de ciliation, type de plastes) et biochimiques (e.g. nature des pigments). Il évalue ainsi l'homogénéité de groupes[82], sur la base du partage de ces ressemblances, ce qui lui permet d'envisager leur monophylie. Toutefois, il ne polarise pas ces ressemblances en distinguant un état ancestral d'un état dérivé. Il ne met pas à l'épreuve une hypothèse d'homologie examinée à la lueur de l'arbre phylogénétique obtenu (cf. la distinction entre homologie primaire et homologie secondaire présentée dans le chapitre 1, p. 31). Nous pouvons donc affirmer que le biologiste anglais ne met pas en œuvre la méthode cladistique. Cependant, à la fin de l'article dans la section « *9. Phylogenetic implications of the nine-kingdom classification* », il propose trois figures qu'il nomme phylogénies, bien qu'elles se présentent avec des groupes actuels en position intermédiaire et comprennent une direction évolutive représentée par les flèches. Elle constitue alors un mélange entre une généalogie avec des relations d'ancêtres à descendants et une phylogénie (avec des relations de parenté). La figure 44 présente la phylogénie qu'il considère la plus simple des trois hypothèses envisagées. Mais la méthode de construction des trois propositions n'est pas présentée.

[82] « There seems little doubt that the Cryptophyta, Chromophyta, and Viridiplantae **are monophyletic, because they are very homogenous in their basic cell structure.** This is less clear at present for the Biliphyta » (Cavalier-Smith, 1981, p. 467-468) [*Plusieurs autres utilisations des termes 'homogeneous' ou 'heterogenous'*]

« The major difference between the Rhodophyceae and the Glaucophyceae is the absence of cilia in the former. But this difference is not enough to justify separation into separate kingdoms or even phyla, as they have **very similar plastid characters (**Kies, 1979) and cytoplasmic starch synthesis, and one glaucophyte (Glaucosphaera) is also non-ciliated (Kies, 1980), which is why I have taken the novel step of including them in the single phylum Biliphyta » (Ibid., p. 468)

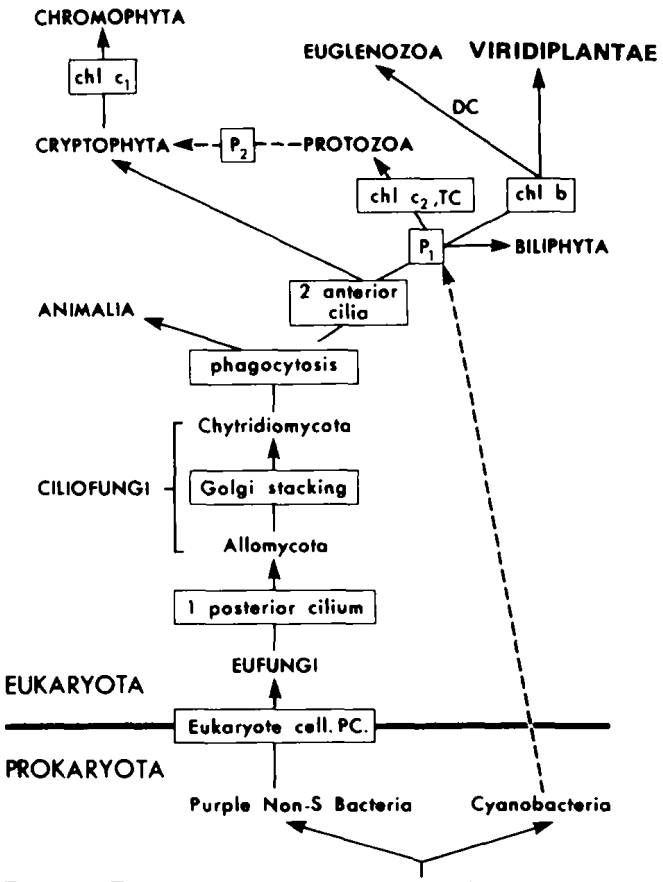


Fig. 1. The simplest phylogeny for the eukaryote kingdoms derives the eight ciliated kingdoms in steps from the non-ciliated Eufungi. The major innovations in eukaryote evolution are shown in the boxes (PC = plate-like cristae, DC = disc-shaped cristae, TC = tubular cristae, chl = chlorophyll). Only two symbiotic events are needed: the acquisition of a prokaryotic cyanophyte (P_1) to form the plastids of the Biliphyta, Euglenozoa, Viridiplantae, and Protozoa (i.e., the dinozoan plastid), and the uptake of an early dinozoan relative to form the plastid of the Cryptophyta (Cavalier-Smith, 1981d).

Figure 44 : représentation de l'une des trois « phylogénies » des Eucaryotes proposées par Cavalier-Smith (1981, p. 473)

Il mobilise le principe d'économie des hypothèses, nommé « rasoir d'Occam », pour indiquer que la première proposition a son choix[83]. La citation de ce principe ne signifie pas pour autant qu'il utilise la méthode cladistique d'analyse de parcimonie.

Concernant le type de caractères, il rejette l'utilisation de comportement et de fonctions (comme le mode de locomotion ou de nutrition). Il prône l'étude de caractères structuraux, en particulier cellulaires. Il rejette aussi la constitution de groupes basés sur l'absence de caractères. Il cite le groupe traditionnel des invertébrés définis par l'absence de colonne

[83] « the use of **Occam's razor** means that Fig. 1 is a better working hypothesis than either Fig. 2 or Fig. 3 for unravelling eukaryote phylogeny » (Ibid., p. 475).

vertébrale et reconnus comme n'étant pas naturel (donc non monophylétique). Il indique le refus de recourir à des grades d'organisation[84], laissant entrevoir le rejet d'une approche gradiste. Cependant, la forme orientée de l'arbre (cf. figure 44) et la place de groupes en position intermédiaire semblent en contradiction avec cette intention de rejeter les grades. Par ailleurs, certaines expressions laissent entrevoir les signes d'une conception gradiste persistante : l'idée de complexité croissante, de direction évolutive ou encore par l'utilisation de l'adjectif « primitif » pour désigner des organismes et non des caractères, bien qu'il la nuance aussitôt en définissant un organisme primitif comme doté de nombreux caractères ancestraux.

> « a **progressive** increase in cell **complexity**. It is, however, much more difficult to assign **a direction** to the transitions, and to decide which of the various branches is really the root. The two problems are interrelated because both involve deciding which **eukaryote taxa are primitive** (in the sense of having many ancestral characters, rather than being inefficient or maladapted) and which are derived » (Ibid., p. 472)

Afin de mieux comprendre le positionnement de T. Cavalier-Smith, l'étude d'articles ultérieurs permet d'apporter un éclairage complémentaire intéressant. Dans un article paru en 1993 portant sur le règne Protozoa et ses 18 phyla, il se positionne explicitement par rapport à Hennig et la cladistique. Il explique qu'il n'y aucune raison de rejeter les groupes paraphylétiques qui sont essentiels pour la taxonomie. Pour lui, ce serait un mythe que les groupes paraphylétiques soient définis strictement de manière négative. Il rejette cependant les groupes polyphylétiques ne partageant pas d'ancêtre commun exclusif. Cavalier-Smith fait donc un usage de la monophylie au sens traditionnel, telle que le pratiquait la systématique évolutionniste.

> « Moreover, it is now thoroughly well established that eukaryotes are monophyletic (…) and that **animals, higher plants, and fungi all evolved from protists**. Thus, Protista is a paraphyletic group. **Contrary to Hennigian opinions (…), however, this is no reason in itself to reject the group**. It is impossible to cut up a phylogenetic tree into purely holophyletic[85] groups: every cut

[84] « It is a basic principle of taxonomy that one groups organisms together **on the basis of common fundamental structures, not on the basis of behaviour, or grades of organisation**. Lumping together all animals that swim as "fish" or that fly as "birds", or all animals lacking a backbone as invertebrates, has long been realised to be **unnatural**. Existing systems of kingdoms based on nutrition and/or motility, or the absence of tissue differentiation, are increasingly recognised as equally **unnatural**. The lack of agreement on a set of well-defined monophyletic kingdoms has not only inhibited the comparative study of cellular evolution, but has also caused much confusion among students seeking an overall view of organic diversity. I hope that the present nine- and seven-kingdom systems based on **fundamental differences in cell structure** will be a useful step towards a sounder and more stable eukaryote classification, that will eventually help to reduce this confusion » (Ibid., p. 478), *c'est nous qui soulignons.*

[85] Holophylétique : terme introduit par Ashlock (1971, cité par Mayr & Bock, 2002, p. 175) pour désigner un groupe monophylétique au sens d'Hennig (un clade) et le distinguer de l'usage plus ancien du terme monophylétique par la systématique évolutionniste qui ne distingue pas les groupes paraphylétiques des groupes holophylétiques.

> generating a holophyletic branch necessarily also generates a paraphyletic stem. **Both holophyletic (3) and paraphyletic taxa are essential for systematics.** It is merely more complicated to define a paraphyletic taxon than a holophyletic one. Holophyletic taxa can be simply defined by using positive shared derived characters that are unique to them (synapomorphies); a paraphyletic taxon, by contrast, has to be defined by using a combination of positive and negative characters, i.e., the presence of one or more synapomorphies that originated in the ancestral member of the taxon coupled with the absence of those synapomorphies that characterize the taxa that evolved from the paraphyletic taxon in question. (**It is a myth that paraphyletic groups are purely negatively defined** (…) or less real than holophyletic ones: all taxa are made by cutting the phylogenetic tree; the position of each cut, which should immediately precede the origin of an important new synapomorphy, simultaneously is used to define the derived holophyletic taxon and to be part of the definition of **its paraphyletic ancestral taxon**, in conjunction with the positive synapomorphy that marked its origin, and also the absence of all those synapomorphies that define any other taxa derived from it.) **What should be avoided, as all systematists agree, is the polyphyletic grouping together of several separately lopped branche**s: each taxon should correspond to a part of the tree having a single cut at its base: but it may either have no additional cuts (i.e., be holophyletic) or be bounded by one or more additional cuts higher up the tree » (Cavalier-Smith, 1993, p. 955), *c'est nous qui soulignons*

Dans un article de 1998 que nous présenterons ultérieurement et dans lequel il révise sa classification réduite à six règnes, Cavalier-Smith affirme, haut et fort, son opposition à Hennig[86].

Considérant que la cladistique reste trop restrictive et conduit à une classification incomplète, l'auteur utilise, à la suite d'Ernst Mayr, le terme de « cladification » pour désigner l'approche hennigienne (cf. figure 45). Mayr développe cette notion dans un article publié en 2002 avec W. J. Bock.

> « it is much too incomplete to be properly called a classification. Ernst Mayr (pers. comm.) has recently called such a set of nested clades a cladification » (Ibid., p. 211).

Rappelons que Ernst Mayr a fortement contribué au développement de la théorie synthétique de l'évolution et de la systématique évolutionniste. Ce dernier s'est opposé à Hennig, en 1974, dans le cadre d'une vive controverse sur la classification cladistique qui marquera durablement l'histoire de la systématique moderne (cf. Biosystema n°29, 2014).

[86] « When I first argued that the kingdoms of life needed reclassifying on phylogenetic principles to make them **monophyletic** (Cavalier-Smith, 1978), **I was complimented by certain cladists who mistakenly thought I was applying the principles of Hennig** (1966) because I was using cladistic reasoning and advocating a phylogenetic classification with strictly monophyletic taxa. However, I had not then even heard of Hennig or his confusing redefinition of the term monophyletic, **which I do not accept**. Like classical phylogeneticists, I use the word monophyletic to include both holophyletic (Ashlock, 1971, i.e. monophyletic *sensu* Hennig, 1966) and paraphyletic » (Cavalier-Smith, 1998, p. 210), *c'est nous qui soulignons.*

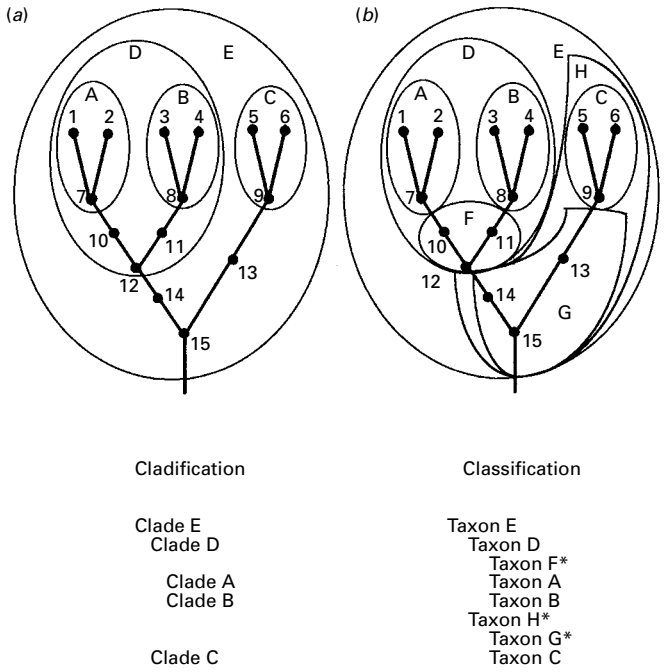


Figure 45 : comparaison de la cladification et de la classification. * : groupe paraphylétique. Reproduit de Cavalier-Smith (1998, p. 211)

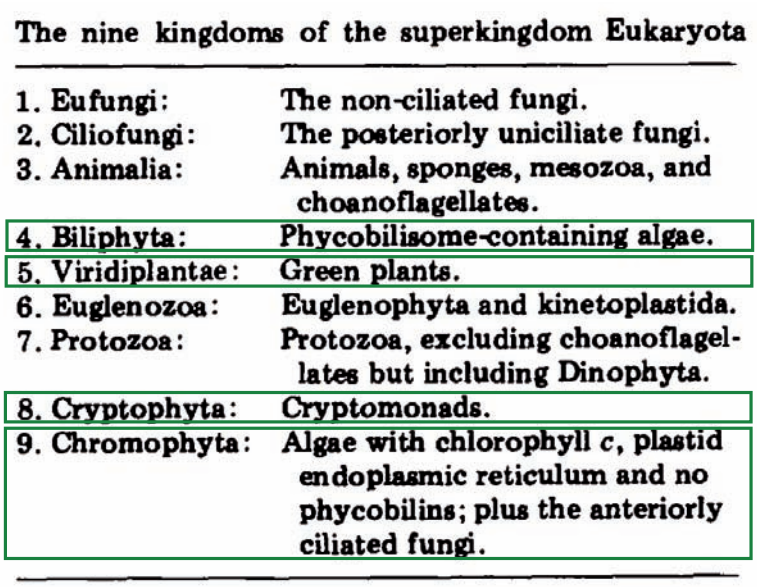
Pour conclure, Thomas Cavalier-Smith a construit sa classification dans un registre explicatif phylogénétique mais non cladistique. En acceptant les groupes paraphylétiques, il se démarque d'Hennig et, en cela, reste dans la mouvance de la systématique évolutionniste. Mais, en refusant d'utiliser des critères écologiques, il s'en démarque.

Certains indices nous font penser qu'il mobilise certaines formes de pensée gradiste, bien que de façon moins marquée que chez d'autres auteurs de la systématique évolutionniste. En effet, il n'utilise pas l'expression d'organismes inférieurs (*lower*) et supérieurs (*higher*).

Ces éclaircissements théoriques et méthodologiques concernant la façon de classer de Cavalier-Smith étant faits, étudions maintenant comment celui-ci envisage les végétaux dans son système classificatoire.

➢ Les raisons de l'éclatement du règne végétal

Cavalier-Smith construit la nécessité théorique de remettre en cause l'unicité du règne végétal, Plantae (au sens de Whittaker). Il propose un système à neuf règnes dont quatre seraient végétaux (en vert dans la figure 46).



The nine kingdoms of the superkingdom Eukaryota

1. Eufungi:	The non-ciliated fungi.
2. Ciliofungi:	The posteriorly uniciliate fungi.
3. Animalia:	Animals, sponges, mesozoa, and choanoflagellates.
4. Biliphyta:	Phycobilisome-containing algae.
5. Viridiplantae:	Green plants.
6. Euglenozoa:	Euglenophyta and kinetoplastida.
7. Protozoa:	Protozoa, excluding choanoflagellates but including Dinophyta.
8. Cryptophyta:	Cryptomonads.
9. Chromophyta:	Algae with chlorophyll *c*, plastid endoplasmic reticulum and no phycobilins; plus the anteriorly ciliated fungi.

Figure 46 : les neufs règnes eucaryotiques dont quatre règnes végétaux (que nous encadrons en vert). Reproduit de Cavalier-Smith, 1981, p. 462.

Il remet en cause le regroupement sur la base du partage de la photosynthèse chez des organismes hétérogènes qui, selon lui, serait une vague considération nutritive et écologique (p. 470). Il explicite la démarche[87] qui le conduit à proposer quatre règnes végétaux et non plus un seul. Il commence par éliminer les champignons du règne végétal, comme l'avait fait auparavant Whittaker. Mais le règne qui en résulte, largement photosynthétique, n'est pas pour autant monophylétique, sur la base de critères d'ultrastructures cellulaires et de données biochimiques. Il sort des végétaux les groupes photosynthétiques des Euglenophytes et des Dinophytes. Sur la base d'ultrastructures cellulaires (comme la forme des crêtes mitochondriales), il fera des premiers un règne indépendant, les Euglenozoa, en les groupant avec les Kinetoplastida[88]. Il rattachera les Dinophytes au règne Protozoa, terme repris d'Owen. Ce règne regroupe huit phyla décrits comme possédant des mitochondries à crête tubulaires (plus rarement vésiculaires, voire sans mitochondries) et majoritairement phagotrophes, mais pouvant être photosynthétiques.

[87] « Though the removal of the fungi (in the broad sense) from the classical plant kingdom leaves behind a more homogeneous group that is **largely photosynthetic**, **comparative ultra-structural and biochemical studies indicate that this photosynthetic residue is not a monophyletic unit** that can be clearly distinguished from non-photosynthetic unicellular phagotrophs. However, if the Euglenophyta and Dinophyta are set aside as basically "protozoan" groups (cf. Round, 1980), because of their frequent phagotrophy and clear relationship with other protozoa, **the remaining photosynthetic eukaryotes fall clearly into four groups each of which is arguably monophyletic, and which can be treated as four separate plant kingdoms: the Viridiplantae, the Biliphyta, the Cryptophyta, and the Chromophyta** » (Ibid., p. 466), *c'est nous qui soulignons.*

[88] Groupe comprenant notamment les trypanosomes, unicellulaires flagellés et agents de la maladie du sommeil ou de la maladie de Chagas.

Il définit alors quatre règnes végétaux indépendants : Viridiplantae (algues vertes et plantes terrestres), Biliphyta (algues rouges et glaucophycées), Cryptophyta et Chromophyta. Ce dernier règne comprend quatre phyla, dont les Heterokonta (dont les algues brunes, les champignons Oomycètes), les Bacillariophyta (diatomées) et les Haptophyta (Coccolithophoridés).

À la suite de Margulis, Cavalier-Smith mobilise la théorie endosymbiotique. Il avance l'idée d'une origine multiple des plastes[89] qui expliquerait les différences d'organisation des plastes et de leurs pigments photosynthétiques dans les différentes lignées végétales, indépendantes.

La figure 44 comporte deux événements d'endosymbiose notés P1 et P2 : le premier impliquerait une cyanobactérie et le second une algue eucaryote formant le plaste à trois ou quatre membranes des Cryptophytes et des Chromophytes, contenant de la chlorophylle c. Ainsi la nécessité d'individualiser quatre règnes, qu'il qualifie de végétaux, s'établit sur le partage de caractères ultra-structuraux et biochimiques, comme par exemple la structure des plastes et la nature des pigments photosynthétiques. En comparaison avec les précédents auteurs, Cavalier-Smith utilise fortement les données ultrastructurales permises par les avancées de la microscopie électronique.

Cavalier-Smith envisage également certains empiriques nécessaires pour asseoir ou modifier sa classification, notamment l'étude de caractères moléculaires (séquences de certaines gènes) et l'analyse des caractères de groupes moins connus.

La figure 47 synthétise notre analyse. Elle modélise la problématisation mise en œuvre par Tom Cavalier-Smith expliquant sa classification et, plus particulièrement, le polyphylétisme des végétaux, constituant quatre règnes pouvant être regroupés en deux.

[89] «Though the names chosen for the four plant kingdoms refer to their plastid pigments, it is important to emphasise, in view of the possibility that **plastids have arisen several times by endosymbiosis** (Margulis, 1970; Stanier, 1974; Phillips and Carl 1977; Gibbs, 1981; Cavalier-Smith, 1981a), that **ciliary and mitochondrial characters also point to the monophyly and distinctness of each of the four groups**. » (Ibid., p. 467), *c'est nous qui soulignons.*

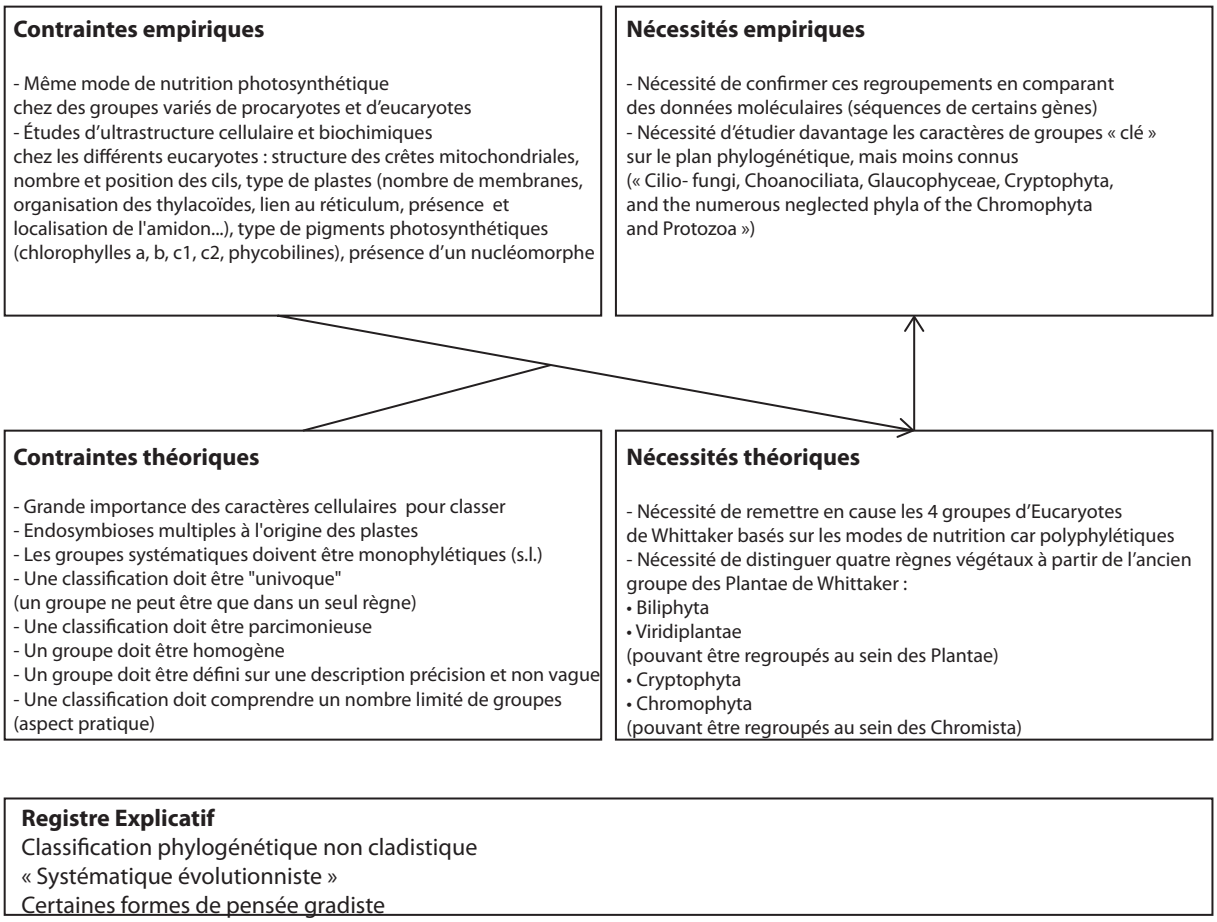


Figure 47 : modélisation de la problématisation développée par T. Cavalier-Smith (1981) pour expliquer le polyphylétisme des végétaux

Dans la dernière section de son article, Cavalier-Smith propose à des fins pédagogiques ('elementary teaching') le regroupement de plusieurs règnes pour en limiter le nombre[90]. Il réunit, d'une part, les deux règnes Biliphyta et Viridiplantae au sein de celui de Plantae et, d'autre part, les règnes Chromophyta et Cryptophyta au sein d'un nouveau : celui des Chromista. Le nombre de neuf règnes eucaryotiques se réduit à sept.

Il va même au delà en diminuant à cinq le nombre de règnes eucaryotiques par la réunion des règnes Euglenozoa et Protozoa au sein des Protista, ainsi que par la réunion des deux groupes de champignons au sein des Fungi[91].

[90] « It is especially in **elementary teaching** that we should aim for **clear definitions** that will not confuse. I do not see how biological diversity can be taught in a clear way even to **school children** with fewer than the six kingdoms of Fig. 4. Even for **elementary teaching**, the Chromista are so different from both the Protista and the Plantae that to lump them with either would cause great confusion. The transition between this simplified scheme and the more complex **ten-kingdom** one of Fig. 1 needed for detailed phylogenetic purposes would not be difficult. » (Ibid., p. 477), *c'est nous qui soulignons.*

[91] « **It is possible that for some scientific purposes the five eukaryote kingdoms** of Fig. 4 **may be thought sufficient**. In that case, the kingdoms from Fig. 1 that have been lumped together to produce Fig. 4 can be treated as **subkingdoms**. All the kingdoms would then have either two or three subkingdoms (Table 11). For the first time this would give a precise definition of the Protista. By making greater use of the subkingdom concept in this way one can embody both important relationships and major divergences in the taxonomic » (Ibid., p. 477), *c'est nous qui soulignons.*

La figure 48 récapitule une proposition finale de classification en six règnes du vivant, qu'il sera amené à faire évoluer à l'occasion d'articles ultérieurs.

Simplified six-kingdom classification of living organisms

Superkingdom	Kingdom	Subkingdom
1. Prokaryota	1. Bacteria	1. Eubacteria 2. Archaebacteria
2. Eukaryota	1. Fungi	1. Eufungi 2. Ciliofungi
	2. Animalia	1. Parazoa 2. Mesozoa 3. Metazoa
	3. Protista	1. Protozoa 2. Euglenozoa
	4. Plantae	1. Biliphyta 2. Viridiplantae
	5. Chromista	1. Cryptophyta 2. Chromophyta

Figure 48 : la classification du vivant à six règnes, dont deux règnes végétaux encadrés en vert (par nous). Reproduit de Cavalier-Smith, 1981, p. 477.

Cependant, en 1981, la préférence de Cavalier-Smith ira au système à sept règnes eucaryotiques[92]. Il pense que les Chromista et les Fungi sont bien monophylétiques et il s'attache à réduire le nombre de règnes de la classification, une préoccupation partagée avec d'autres auteurs comme nous l'avons déjà souligné.

Pour conclure, la classification de Cavalier-Smith proposée en 1981 conduit à une remise en cause de l'unicité taxonomique du règne végétal. Son système comprend deux ou quatre règnes végétaux indépendants. Cependant, nous pouvons questionner l'usage du qualificatif « végétal » pour désigner ces règnes définis par cet auteur. Si il n'est pas envisageable de classer en fonction de critères fonctionnels et écologiques, comment expliquer la persistance de ce qualificatif de végétal sur un plan taxonomique ? Probablement, il nous semble être le reflet d'un héritage historique, encore présent durant cette période charnière. Mais l'attachement à ce terme historique au niveau taxonomique est lié à une volonté de maintien du code botanique afin de l'appliquer aux champignons et aux quatre règnes végétaux de ce nouveau système (p. 471). Une préoccupation nomenclaturale explique

[92] « **I prefer the seven-kingdom system** and advocate its widespread adoption for general scientific use because I believe that the Chromista and Fungi are **monophyletic units** and wish to **minimize the number** of kingdoms. Those who think that the subkingdoms in one or both of these groups are not more closely related to each other than to any other kingdoms may prefer the nine-kingdom one or an intermediate eight-kingdom one. » (Cavalier-Smith, 1981, p. 478), *c'est nous qui soulignons.*

donc, au moins partiellement, le maintien de l'utilisation du terme de végétal par T. Cavalier-Smith.

À présent, abordons plus succinctement l'évolution de la classification de Cavalier-Smith à l'occasion de publications ultérieures.

- **Révision de la classification de Cavalier-Smith : le système à huit règnes puis à six règnes**

➢ Le système à huit règnes (1993)

En 1993, T. Cavalier-Smith publie un article portant essentiellement sur le règne Protozoa et ses 18 phyla, dans lequel il propose une révision de sa classification comptant alors huit règnes, répartis au sein de deux empires : Bacteria et Eukaryota. Cet article est trois fois plus cité que celui de 1981[93].

La classification est fondée sur l'étude de caractères ultrastructuraux et biochimiques, mais elle intègre également des analyses de séquences d'ARN ribosomial (ARNr). Cet article contient un arbre (phénogramme) produit par la méthode *Neighbor Joining*, un algorithme de calcul de la ressemblance globale, alors récemment développé (Saitou & Nei, 1987).

La structure de son système révisé est présentée en figure 49.

TABLE 1. The 8 kingdoms of life and their 10 subkingdoms

EMPIRE BACTERIA[a]		
Kingdom 1. EUBACTERIA[a]		
Subkingdoms:	1. Negibacteria[a]	2. Posibacteria[a]
Kingdom 2. ARCHAEBACTERIA[a]		
EMPIRE EUKARYOTA		
Superkingdom 1. ARCHEZOA		
Kingdom ARCHEZOA		
Superkingdom 2. METAKARYOTA		
Kingdom 1. PROTOZOA		
Subkingdoms:	1. Adictyozoa	2. Dictyozoa
Kingdom 2. PLANTAE		
Subkingdoms:	1. Viridiplantae (green plants)	2. Biliphyta (red algae and glaucophytes)
Kingdom 3. ANIMALIA		
Subkingdoms:	1. Radiata	2. Bilateria
Kingdom 4. FUNGI		
Kingdom 5. CHROMISTA		
Subkingdoms:	1. Chlorarachnia	2. Euchromista (cryptomonads, *Goniomonas*, heterokonts, and haptophytes)

[a] My classification of these bacterial taxa into phyla and classes, taking into account both rRNA sequences and the distribution of many ultrastructural and biochemical characters, is summarized in reference 40a.

Figure 49 : classification à huit règnes. Reproduit de Cavalier-Smith, 1993, p. 955.

L'auteur conserve les deux règnes qu'il qualifie de végétaux, Plantae et Chromista, envisagés à la fin de son article, en proposant des regroupements de règnes, deux à deux. Les modifications qu'il apporte ici ne concernent pas directement les règnes végétaux. Soulignons

[93] Nombre de citations de l'article de Cavalier-Smith (1993) dans les bases, en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 624 / WoS (Thomson Reuters) : 691 / Google Scholar : 908.

cependant ces changements pour comprendre davantage sa logique classificatoire. Tout d'abord, il constitue un nouveau règne, nommé Archezoa, en sortant trois groupes du règne Protozoa (Archamoebae, Metamonada, and Microsporidia) sur la base de caractéristiques cellulaires (e.g. absence de structures telles que les mitochondries, présence de ribosomes 70S comme les bactéries).

De plus, il distingue deux règnes les Archaebacteria et les Eubacteria, qu'il regroupe au sein de ce qu'il nomme l'empire Bacteria. Par ce regroupement, il s'oppose ainsi à la proposition de Carl Woese (1928-2012) qui mettait en avant l'idée que la première division du vivant ne distingue pas Eucaryotes et Procaryotes mais Eucaryotes, Archaebacteria et Eubacteria. Ces trois divisions majeures du vivant ont été appelées « primary kingdoms » ou « urkingdoms » par Woese & Fox (1977) et Woese (1987) puis domaines du vivant en 1990, un terme qu'il jugeait moins anthropomorphique que les termes : règne, empire ou royaume[94]. L'arbre universel du vivant, proposé par Woese (1987) sur la base de comparaisons moléculaires (ARNr16S), marqua très fortement la systématique (cf. figure 50). Le nombre de citations de cet article est colossal pour la discipline[95]. Bien que majeure en systématique, nous ne présenterons pas de façon plus détaillée cette classification de Woese. Celle-ci porte sur le niveau taxonomique supérieur et donc n'a pas de conséquence directe sur le groupe des végétaux qui nous intéresse ici. Cependant, en créant des domaines du vivant (que Cavalier-Smith appelle empires), la phylogénie de Woese diminue *de facto* le niveau hiérarchique du règne. Nous pouvons apercevoir sur la figure 50 que les groupes animaux et végétaux constituant l'unique division du vivant jusqu'au XIX^{e} siècle se retrouvent ainsi marginalisés.

[94] Sapp (2009, p. 262)

[95] Nombre de citations de l'article de Woese (1987) dans les bases, en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 3782 / WoS (Thomson Reuters) : 5089 / Google Scholar : 7339.Article de Woese et al. (1990) : Scopus (Elsevier) : 2915 / WoS (Thomson Reuters) : 3451 / Google Scholar : 5108.

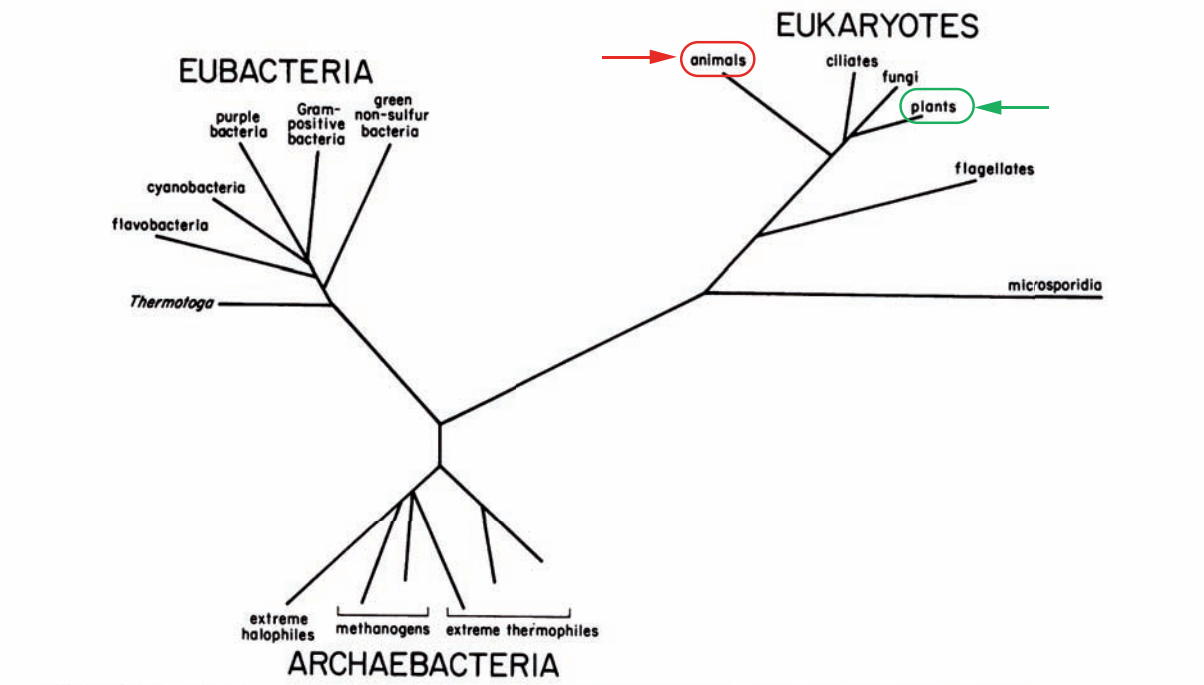


FIG. 4. Universal phylogenetic tree determined from rRNA sequence comparisons. A matrix of evolutionary distances (99) was calculated from an alignment (260) of representative 16S rRNA sequences from each of the three urkingdoms. This was used to construct a distance tree (36), based upon those positions represented in all sequences in the alignment in homologous secondary structural elements (75). Line lengths on the tree are proportional to calculated distances. The alignment includes the following eubacterial sequences: *Thermotoga maritima* (1); green non-sulfur bacteria, *Thermomicrobium roseum* (162); flavobacteria, *Flavobacterium heparinum* (234); cyanobacteria, *Anacystis nidulans* (224); gram-positive bacteria, *Bacillus subtilis* (68); and purple bacteria, *Escherichia coli* (19); the following archaebacterial sequences: extreme halophiles, *Halobacterium volcanii* (72); methanogens, *Methanococcus vannielii* (96) and *Methanobacterium formicicum* (124); and extreme thermophiles, *Thermococcus celer* (Woese et al., unpublished data), *Desulfurococcus mobilis* (R. Garrett, personal communication), and *Thermoproteus tenax* (126); and the following eucaryotic sequences: microsporidia, *Vairimorpha necatrix* (226a); flagellates, *Euglena gracilis* (196); cellular slime molds, *Dictyostelium discoideum* (145); ciliates, *Paramecium tetraurelia* (195); fungi, *Saccharomyces cerevisiae* (179); plants, *Zea mays* (147); and animals, *Xenopus laevis* (181). Branching order within each kingdom is correct to a first approximation only. See the trees for the individual kingdoms for precise branching orders.

Figure 50 : arbre phylogénétique universel. Les flèches pointent les groupes animaux et végétaux qui se trouvent « marginalisés » dans cet arbre. Modifié d'après Woese, 1987, p. 231

Comme E. Mayr (1990) dans la revue *Nature*, T. Cavalier-Smith se refuse à ne pas considérer valide le regroupement des Procaryotes, bien que non monophylétique[96].

Dans l'article *Two empires or three?*, E. Mayr (1998) s'oppose à C. Woese. E. Mayr s'attache à ce qu'une classification reflète les degrés de différence et constitue un puissant système de stockage d'informations biologiques[97].

[96] « Therefore, the frequent statement (e.g., see Patterson, 1980) that prokaryotes share only negative characters is false. Both Bacteria and Eubacteria are probably paraphyletic taxa, like the Protozoa, but this does not detract from their great utility » (CavalierSmith, 1993, p. 954-955).

[97] « The evidence presented by me shows clearly that the archaebacteria are so much more similar to the eubacteria than to the eukaryotes that **their removal from the prokaryotes is not justified.** (…) Ranking, in any scheme of classification of items (living or not), is by necessity based on **degree of difference**. The two kinds of bacteria, in the vast majority of their characteristics, are exceedingly similar to each other and fundamentally so different from the eukaryotes that they have to be ranked as a single taxon, the prokaryotes, different from the only other taxon of this rank, the eukaryotes. **Only a two-empire classification correctly reflects this structure of the living world.** It has the additional virtue that it is a far superior **information retrieval system** and was therefore adopted by nearly everybody as soon as it was carefully argued by Stanier and van Niel (1962) » (Mayr, 1998, p. 9723), *c'est nous qui soulignons.*

➢ Le système à six règnes (1998)

En 1998, T. Cavalier-Smith publie un article intitulé *A revised six-kingdom system of life,* dans lequel le nouveau système classificatoire comprend six règnes du vivant : Bacteria, Protozoa, Animalia, Fungi, Plantae et Chromista. Cet article est cité de façon équivalente à celui de 1993[98]. Dans cet article, l'auteur complète son analyse par de nombreuses études de séquences qui se sont largement développées durant les années 1990.

La classification proposée est très proche de celle de 1993, bien que comprenant six règnes au lieu de huit. La première différence porte sur le groupe Archezoa qui devient, en 1998, un sous-règne au sein des Protozoa. Cette révision est liée à l'absence de mitochondries interprétée, dans cet article, comme une perte secondaire et non plus un état ancestral.

La seconde différence porte sur le groupe Bacteria qui bascule du rang de super-règne à celui de règne. Dans l'article, Cavalier-Smith rédige un long paragraphe pour défendre l'idée du concept de bactérie au sens classique du terme[99].

Dès le résumé de son article, Cavalier-Smith affirme rester très attaché à la limitation du nombre de règnes dans sa classification[100].

La figure 51 présente le nouvel arbre. Comme celui réalisé en 1981, il place des groupes en position intermédiaire et il semble mélanger les relations d'ancêtres à descendants et leurs relations de parenté. Dans la légende de la figure, il évoque cinq événements d'endosymbiose.

[98] Nombre de citations de l'article de Cavalier-Smith (1998) dans les bases, en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 616 / WoS (Thomson Reuters) : 648 / Google Scholar : 934.

[99] « Whether Bacteria are ranked as a kingdom or a superkingdom is less important than the retention of both the name and the concept of bacteria in their classical meaning » (CavalierSmith, 1998, p. 215).

[100] « Intermediate high level categories (superkingdom, subkingdom, branch, infrakingdom, superphylum, subphylum and infraphylum) are extensively used to avoid splitting organisms into an excessive number of kingdoms and phyla (60 only being recognized) » (Ibid., p. 203).

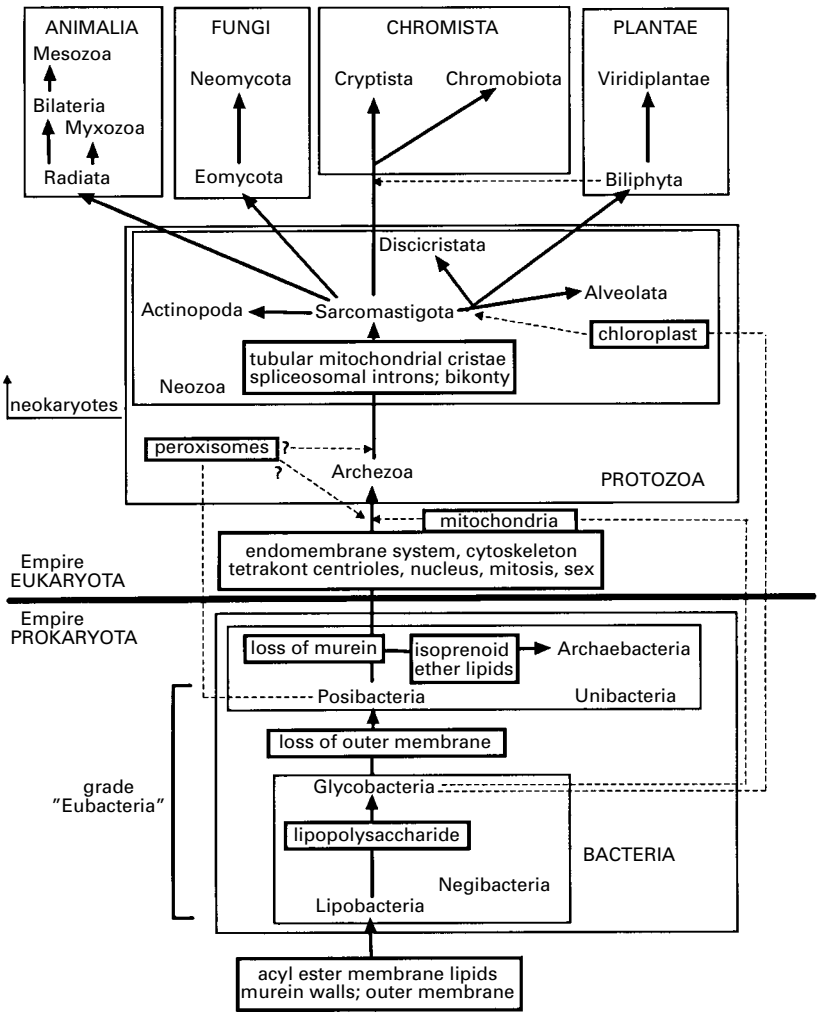


Fig. 1. Postulated phylogenetic relationships between the six kingdoms (upper case) and their subkingdoms. Infra-

Figure 51 : arbre des relations phylogénétiques supposées. Reproduit de Cavalier-Smith, 1998, p. 206.

Son système à six règnes fut l'objet de différentes actualisations successives (2004, 2010). Son influence restera durable comme en atteste l'existence d'articles récents tels que celui de Ruggiero *et al.* (2015) *A higher level classification of all living organisms*. Cet article, dont T. Cavalier-Smith est l'un des neuf auteurs, propose une classification présentée comme consensuelle, l'objectif étant d'établir une base de données des taxons biologiques, nommée Catalogue of Life (CoL). Cette base suit la classification à six règnes proposée par T. Cavalier-Smith en 1998.

Soulignons pour finir que T. Cavalier-Smith fut à l'origine de plusieurs groupes dont certains ont été ensuite contestés comme les Chromista alors que d'autres sont toujours valides aujourd'hui, comme les Opisthokonta (1987), les Rhizaria (2002) et les Excavata (2002)[101].

[101] Pour plus de détails, se reporter à la synthèse sur la classification des Eucaryotes d'Adl *et al.* (2005, 2012).

2.2.8. Le problème de la recherche de groupes strictement monophylétiques : les clades

Si des auteurs comme Tom Cavalier-Smith jugent valides des groupes paraphylétiques dans leur classification, ce n'est pas le cas de la grande majorité des systématiciens qui, à la suite d'Hennig, ne retiendront que des clades, rassemblant un ancêtre commun et l'ensemble de ses descendants. Le rejet des groupes paraphylétiques constitue une différence majeure entre systèmes taxonomiques (Parfrey *et al.*, 2006, p. 2069).

Dès maintenant, intéressons-nous uniquement aux classifications phylogénétiques qui considèrent les clades comme des groupes valides. Construire un arbre phylogénétique revêt un but taxonomique, puisque la taxonomie doit être basée sur la phylogénie dans un cadre de pensée hennigien. Un arbre permet d'étudier l'histoire évolutive de nombreux caractères. Nous présenterons l'évolution de la phylogénie des Eucaryotes durant les années 2000-2010, en discutant plus particulièrement des relations évolutives entre les organismes pourvus de plastes, dont l'histoire évolue avec les changements phylogénétiques.

- **L'hypothèse des Chromalveolata**

➢ **Un arbre comprenant cinq ou six super-groupes eucaryotiques (2004, 2005)**

Beaucoup d'auteurs n'utilisent plus le terme de règne, marqué par la remise en cause des anciens règnes et par une dimension anthropomorphique, mais préfèrent l'expression plus neutre de super-groupe ou de cluster.

Durant les années 2000, les avancées portant sur l'arbre des Eucaryotes convergent vers cinq à six super-groupes[102]. Nous nous référons ici aux articles de Keeling *et al.* (2005)[103] et Adl *et al.* (2005)[104]. Ces groupes sont : Opisthokonta, Amoebozoa (souvent regroupés au sein des Unikontes), Plantae, Chromalveolata, Excavata et Rhizaria.

Dans leur article de synthèse *The tree of eukaryotes*, Keeling[105] *et al.* (2005) expliquent comment est construit cet arbre phylogénétique, sur la base de nombreuses données ainsi que

[102] À comparer avec les cinq règnes eucaryotiques proposés par Cavalier-Smith à la même époque (2004) dont le règne paraphylétique des Protozoa.

[103] Nombre de citations de l'article de Keeling et al. (2005) dans les bases, en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 381 / WoS (Thomson Reuters) : 397 / Google Scholar : 491.

[104] Nombre de citations de l'article de Adl et al. (2005) dans les bases, en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 850 / WoS (Thomson Reuters) : 937 / Google Scholar : 1365.

[105] Patrick J. Keeling dirige actuellement un laboratoire canadien (University of British Columbia, Vancouver) : « The Keeling Lab ». (http://www3.botany.ubc.ca/keeling/index.html, consulté le 28 février 2016), laboratoire spécialisé dans l'étude de l'évolution moléculaire des Eucaryotes unicellulaires.

des modèles d'évolution moléculaire[106]. Nous ne détaillerons pas les méthodes de construction phylogénétique, dont la complexité nous éloignerait trop de notre problématique. Nous pouvons souligner la grande importance prise par les données moléculaires dans l'étude des relations phylogénétiques concernant les organismes unicellulaires.

Dans un article paru en 2004 sur l'histoire évolutive des plastes et de leurs hôtes, Keeling propose l'arbre reproduit en figure 52. Cette phylogénie est similaire à celle présentée dans l'article de Keeling *et al.* (2005) mais cette figure souligne les groupes qui possèdent des plastes (encadrés en noir), rendant plus aisée leur identification.

[106] « The process of resolving the tree involves the synthesis of many kinds of data, including single-gene trees, multigene analyses, and other kinds of molecular and structural characters (…) We are now in a period of rebuilding this tree using a wider variety of data, which are largely, but not entirely, molecular in nature, and are used in combination with several distinct strategies to examine large-scale phylogenetic questions »(2005, p. 670).

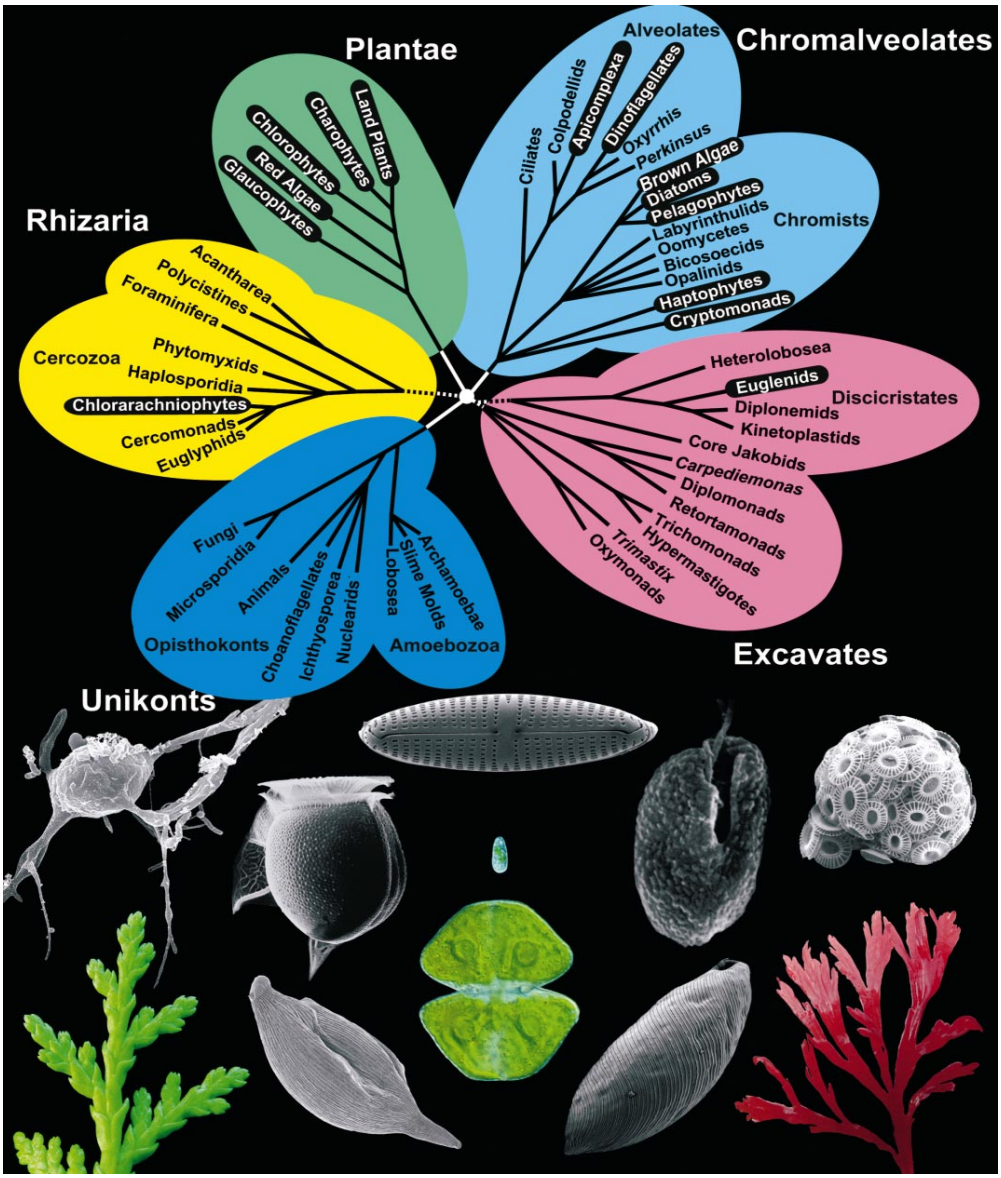


Fig. 1. Tree of eukaryotes and diversity of plastid-bearing eukaryotes. Top: an unrooted hypothetical phylogeny of eukaryotes based on a synthesis of many gene trees, protein insertions and deletions, and cellular and biochemical characters. In this tree, eukaryotes are divided into five large groups, or "supergroups," within which representatives of the major lineages are shown with their interrelationships as we know them. Dotted lines are plausible but more weakly supported parts of the tree. All groups in which plastids are known from at least a large number of species are indicated by white text on black. Bottom: a small taste of the diversity of plastid-bearing eukaryotes can be seen from one representative of each of the major "algal" lineages. Outside photographs, clockwise from

Figure 52 : arbre phylogénétique des Eucaryotes comportant cinq super-groupes et présentant l'hypothèse des Chromalveolata. Les groupes encadrés en noir possèdent des plastes. Reproduit de Keeling, 2004, p. 1482.

La forme de l'arbre contraste fortement avec les arbres précédents. Aucune direction évolutive n'est figurée et aucun groupe n'est placé en position intermédiaire, attestant là d'une volonté de rupture avec la pensée gradiste.

Quatre des cinq super-groupes eucaryotiques comprennent des lignées pourvues de plastes. Dépourvus de plaste, nous ne discuterons pas des Opisthokonta (comprenant notamment les animaux, Metazoa, et les champignons, Fungi) pas plus que des Amoebozoa, regroupés au sein des Unikontes dans cet arbre (ce qui n'est pas le cas chez Adl *et al.*, 2005).

Nous retrouvons le groupe Plantae avec une extension similaire à celle définie par Cavalier-Smith (Glaucophytes, algues rouges, vertes et plantes terrestres) possédant un plaste à deux membranes issu de l'endosymbiose primaire d'une cyanobactérie, soit entre un milliard à un milliard et demi d'années selon Rodríguez-Ezpeleta *et al.*, 2005.

Les Excavata comprennent de nombreuses lignées unicellulaires dont les Euglenophytes, disposant de plastes verts, ce dont nous avons déjà largement discuté. Les Rhizaria possèdent une lignée photosynthétique, les Chlorarachniophytes. Ces deux super-groupes sont récents (2002) et définis sur la base de données moléculaires.

Un nouveau groupe, les Chromalveolata, se dégage sur la base du partage d'un plaste issu d'une endosymbiose secondaire à partir d'une algue rouge. Il rassemble les Chromistes, les Alvéolates, ainsi que les Haptophytes et les Cryptomonades. Ce nouvel assemblage est alors soutenu par plusieurs études moléculaires (2005).

Dans le cadre de cette phylogénie des Eucaryotes, Patrick J. Keeling (2004) propose un scénario évolutif des plastes, qui prend en compte de nombreuses données ultrastructurales (organisation des plastes), biochimiques et moléculaires (cf. figure 53).

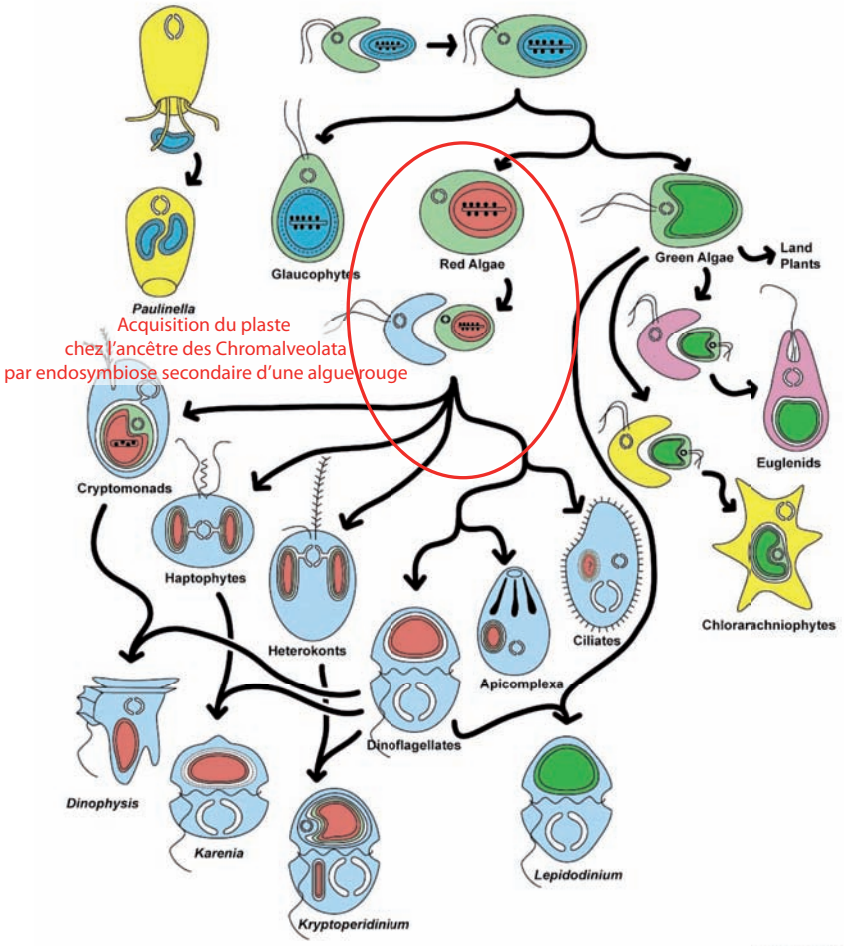


Figure 53 : évolution des plastes et endosymbiose. Reproduit et modifié, d'après de Keeling, 2004, p. 488

Cette histoire évolutive implique de multiples phénomènes d'endosymbiose (primaire, secondaire et tertiaire) qui s'accompagnent de transfert latéral de gènes entre le génome de l'hôte et de l'algue endosymbiotique à l'origine du plaste.

Plusieurs arbres phylogénétiques se superposent : celui des hôtes, de leurs plastes et même de leur gènes, en raison des transferts génétiques latéraux entre ADN plastidial et nucléaire (Keeling, 2004)[107].

Par ailleurs, soulignons le cas du groupe Apicomplexa, au sein des Alveolata, dont la figure 52 indique la présence de plastes. Pourtant, ce groupe comprend des organismes non photosynthétiques qui, auparavant, étaient classés au sein des animaux unicellulaires (Protozoa). Des études récentes montrent qu'ils auraient été photosynthétiques par le passé et donc végétaux au sens fonctionnel ! Il s'agit d'organismes comme *Plasmodium sp.,* parasite et agent du paludisme ou malaria. Ils possèdent un plaste non photosynthétique (nommé apicoplaste) impliqué dans différentes voies métaboliques (Foth & McFadden, 2003). Les analyses phylogénétiques révèlent que d'autres lignées ont perdu complètement le plaste de façon secondaire, possédant des gènes dérivés d'un plaste et transférés au génome nucléaire (Keeling, 2010). La perte secondaire de la photosynthèse, constituant un trait de végétalité au sens fonctionnel du terme, est un exemple de l'absence de direction à l'évolution, comme le souligne M-A. Selosse.

> « On touche ici à une seconde caractéristique de l'évolution : elle n'a pas de sens ni de but ; elle est parfaitement réversible. Elle peut déconstruire un jour ce qui a été sélectionné auparavant ! » (Selosse, 2008, p. 232-233).

- **Que sont les végétaux dans cet arbre phylogénétique ?**

Si Cavalier-Smith parle dans son article de plusieurs règnes végétaux - « plant kingdoms » (1981) ou « botanical kingdoms » (1998) - il n'en est plus question dans les articles de Keeling (2004) et Keeling *et al.* (2005). Le terme « plants » n'est plus utilisé que pour désigner le groupe des plantes terrestres (Embryophyta), au sein du super-groupe Plantae. À plusieurs reprises, le terme « plants » est utilisé en le démarquant des algues[108].

[107] « In the context of the tree of eukaryotes, endosymbiosis implies that **several phylogenetic trees are superimposed over one another**: there is not only the phylogeny of the organisms themselves, but also a somewhat different phylogeny of their plastids and perhaps even different phylogenies of individual plastid genes » (2004, p. 1483), *c'est nous qui soulignons.*

[108] « **Plants and algae**, or more generally eukaryotes with plastids (the photosynthetic organelle of plants and algae and their nonphotosynthetic derivatives) are scattered among four of the five supergroups. » (2004, p. 1481). « Plastids are the organelles of **plants and algae** that harbor photosynthetic and other biochemical pathways for compounds such as aromatic amino acids, heme, isoprenoids, and fatty acids. » (Ibid., p. 1483). « **Plants** are derived from **green algae**. » (Ibid., p. 1489), *c'est nous qui soulignons.*

Cette différence d'usage du terme « plants » nous semble particulièrement intéressante à souligner. Elle reflète une évolution majeure de la classification. Quatre super-groupes eucaryotiques sur cinq comprenant des lignées photosynthétiques, définir un ou deux d'entre eux comme végétal ne semble plus pertinent au regard des nouvelles questions évolutives.
Avec le développement de nouvelles données et des méthodes d'analyse, comment cet arbre phylogénétique a-t-il évolué ?

- **La remise en cause des Chromalveolata et la proposition du super-groupe SAR (Straménopiles Alveolates Rhizaria)**

➢ **Le développement de la phylogénomique**

Avec les années 2000, nous voyons apparaître une nouvelle approche : la phylogénomique, combinant la phylogénétique et la génomique, approche rendue accessible par des méthodes de séquençage de nouvelle génération, moins coûteuses et plus rapides. Dès lors, la phylogénomique devient un puissant outil qui utilise d'importants jeux de données étudiés sur un nombre de taxons toujours plus grand. Delsuc, Brinkmann & Philippe (2005) proposèrent un article de revue présentant les fondements de la phylogénomique, ses intérêts et ses limites. Ils expliquent que les deux étapes cruciales de l'inférence phylogénétique sont généralement préservées, à savoir l'identification de caractères homologues et la reconstruction d'arbre. Les trois principales méthodes de reconstruction d'arbre sont adaptées à la phylogénomique : les méthodes de distance (de type phénétique, comme le neighbor-joining), l'analyse de parcimonie et les méthodes de vraisemblance : maximum de vraisemblance et méthodes bayésiennes (cf. Delsuc *et al.*, 2005, p. 362 pour plus de détails). Ces auteurs nous expliquent que deux grands types de méthode se distinguent selon le type de données étudiées : les premières qui se basent sur des séquences et d'autres, plus récentes, qui s'établissent sur des caractéristiques du génome entier.
En 2007, Burki *et al.* réalisent une étude phylogénomique intitulée *Phylogenomics reshuffles the eukaryotic supergroups*. Ils étudient 49 espèces appartenant aux cinq super-groupes eucaryotiques. Leur analyse moléculaire se fonde sur 123 alignements de gènes, après avoir éliminé les séquences paralogues (pour ne garder que les séquences orthologues, c'est-à-dire héritées d'une séquence ancestrale) et après avoir supprimé les séquences issues de transfert latéral (ou horizontal) de gènes. Une supermatrice, formée de l'ensemble des séquences est analysée grâce à la méthode de maximum de vraisemblance, combinée aux méthodes bayésiennes. Les résultats remettent en cause l'hypothèse des Chromalveolata et conduisent

nos auteurs à proposer un nouveau super-groupe dont le nom SAR est l'acronyme des trois taxons réunis : Straménopiles, Alveolates et Rhizaria. En effet, dans la nouvelle phylogénie obtenue, les Rhizaria forment un groupe monophylétique avec les Straménopiles et les Alveolates, mais les Haptophytes et les Cryptophytes sortent de cet ensemble. Les Haptophytes et les Cryptophytes faisaient partie du groupe des Chromistes (Cavalier-Smith, 1981, 1998), remis en cause par ces nouveaux résultats. Comme ils l'expliquent dans leur étude, le nouveau super-groupe SAR est soutenu uniquement par des données moléculaires et rassemble une proportion importante des Eucaryotes unicellulaires[109].

D'autres études viendront conforter ce nouveau super-groupe SAR et, ainsi, mettre fin à l'hypothèse des Chromalveolata. Keeling (2013) et Burki (2014) soulignent que cette hypothèse joua un rôle important car elle mis l'accent sur des recherches portant sur la diversité algale et sur la compréhension de l'origine des plastes.

L'hypothèse des Chromalvéolates impliquait une unique origine des plastes d'origine secondaire à partir d'une algue rouge. L'apparition du super-groupe SAR complexifie donc le scénario évolutif de l'origine de ces plastes puisque les Cryptophytes et les Haptophytes possèdent ce type de plaste mais ils ne partagent pas un ancêtre commun exclusif avec les organismes photosynthétiques des SAR.

- **La phylogénie proposée par Burki (2014)**

Pour achever notre étude historique, nous souhaitons analyser l'arbre phylogénétique proposé par Fabien Burki (2014), dans un article de revue récent intitulé *The eukaryotic tree of life from a global phylogenomic perspective*[110]. Cet auteur est actuellement post-doctorant au Laboratoire canadien « The Keeling Lab » (Vancouver). L'arbre phylogénétique se trouve reproduit en figure 54.

[109] « The new SAR supergroup implies that the major part of protists diversity shares a common ancestor. Indeed, the chromalveolates members alone already accounted for about half of the recognized species of protists and algae (Cavalier-Smith, 2004). With the addition of rhizarians, **a huge variety of organisms with very different ecology and morphology are now united within a single monophyletic clade**. Finding a synapomorphy that would endorse the unification of these groups will be the next most challenging step in the establishment of eukaryote phylogeny »(Burki et al., 2007, p. 4)*, c'est nous qui soulignons.*

[110] Nombre de citations dans les bases de l'article de Burki (2014), en février 2016 : Scopus (Elsevier) : 23 / WOS (Thomson Reuters) : 22 / Google Scholar : 28.

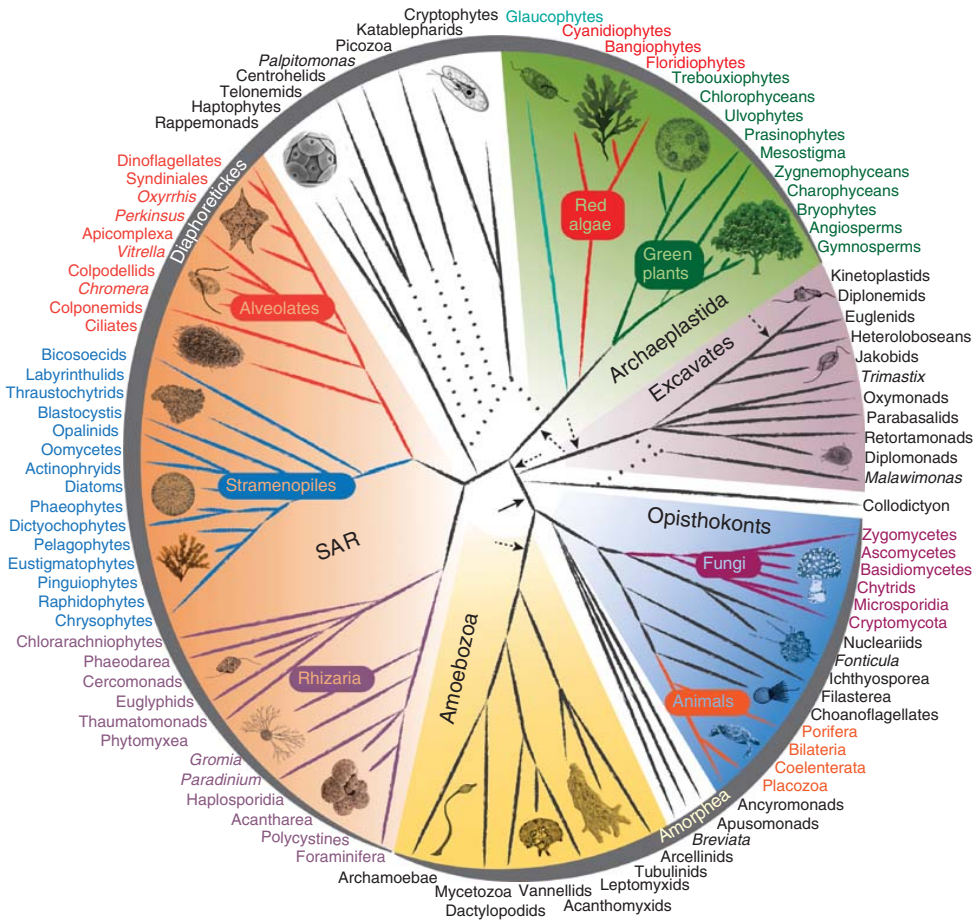


Figure 1. Global tree of eukaryotes from a consensus of phylogenetic evidence (in particular, phylogenomics), rare genomic signatures, and morphological characteristics. Numerous eukaryotic groups are shown (not exhaustively), regardless of their taxonomic rank. Cartoons illustrate the diversity constituting the largest assemblages (colored boxes). The branching pattern does not necessarily represent the inferred relationships between the lineages. Dotted lines denote uncertain relationships, including conflicting positions. Note the solid branch leading to haptophytes and rappemonads: This illustrates the strong support for placing haptophytes as sister to SAR(stramenopiles, alveolates, and Rhizaria) in a recent study (Burki et al. 2012b), but this lineage is not included in a colored assemblage because confirmation is needed. The arrows point to possible positions for the eukaryotic root; the solid arrow corresponds to the most popular hypothesis (Amorphea-bikont rooting), the broken arrows represent the alternative hypotheses discussed in the text. (This figure was inspired by a template provided by Y. Eglit.)

Figure 54 : arbre phylogénétique des Eucaryotes. Reproduit de Burki, 2014, p. 6.

Cet arbre, de forme circulaire, atteste d'une même volonté de rupture avec la pensée gradiste que celle retrouvée dans les arbres précédents (Keeling, 2004, cf. figure 52 ; 2005). Nous retrouvons trois super-groupes déjà présents : Plantae (ou Archaeplastida), Excavates, Opisthokontes, Amoeobozoa. Ces deux derniers taxons étaient regroupés au sein des Unikontes dans l'article de Keeling. Burki (2014) indique que la monophylie des Unikontes (qu'il nomme Amorphea, à la suite de 2012) reste une hypothèse très populaire mais que celle-ci dépend de la position de la racine des Eucaryotes, encore largement discutée.

Le super-groupe Plantae est nommé préférentiellement Archaeplastida. Le terme Plantae se réfère à un règne ayant eu par le passé une extension différente alors que le terme

Archaeplastida explicite l'origine primaire du plaste à deux membranes, constituant une synapomorphie de ce groupe.

Une différence majeure avec les articles de 2004 et 2005 réside dans la disparition du super-groupe Chromalveolata et la confirmation du super-groupe SAR, proposé en 2007. Dans cette phylogénie, les Haptophytes sont placées en groupe frère des SAR. Mais la position des Cryptophytes (et d'autres lignées apparaissant en blanc) n'est pas encore résolue. Certaines études suggèrent de regrouper les Cryptophytes et les Haptophytes au sein des Hacrobia.

Burki discute beaucoup du problème de la place de la racine des Eucaryotes, essentielle pour positionner les différents super-groupes les uns par rapport aux autres. Plusieurs propositions figurent dans l'arbre par des flèches et sont discutées dans l'article.

La figure 55 modélise la problématisation développée par Fabien Burki, dans le but d'expliquer les relations phylogénétiques au sein des Eucaryotes.

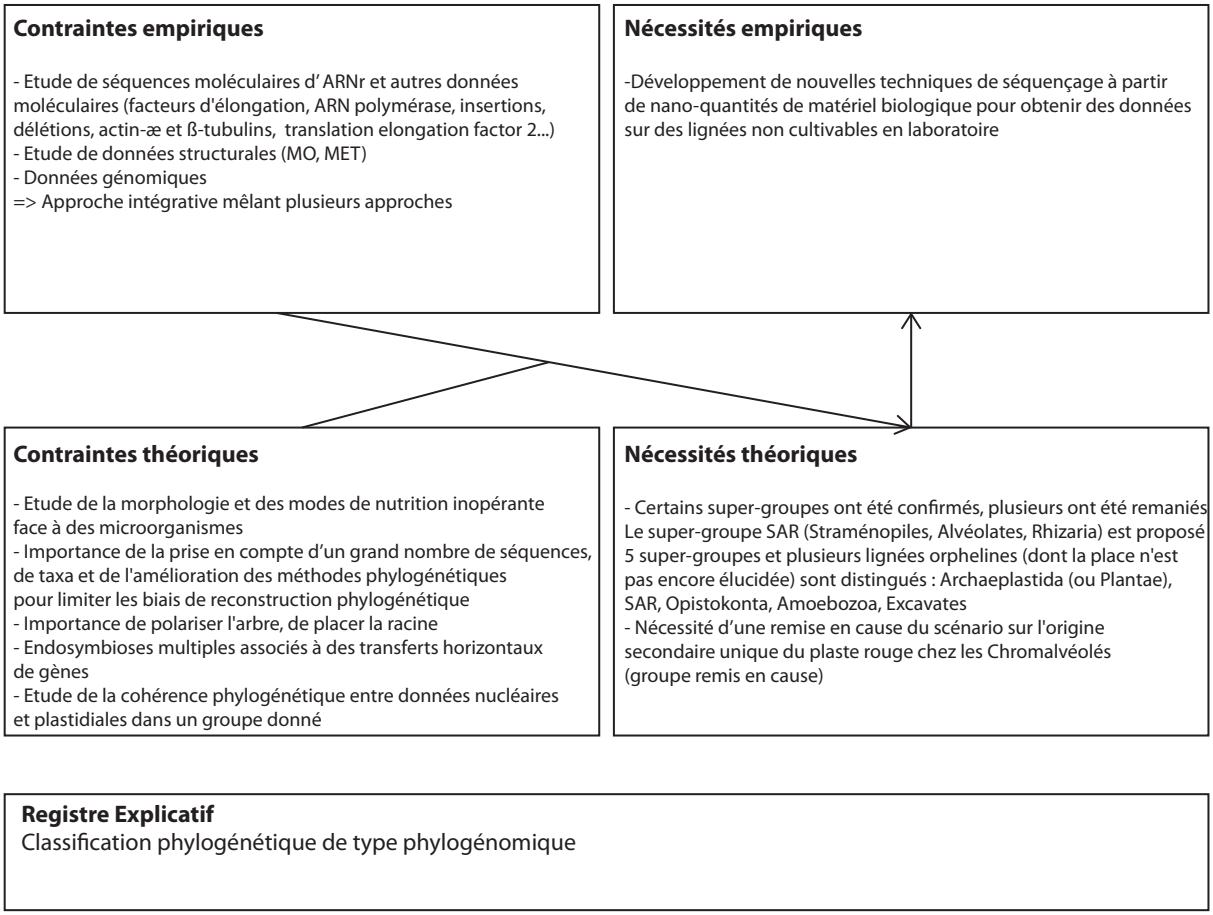


Figure 55 : modélisation de la problématisation développée par F. Burki pour expliquer les relations phylogénétiques au sein des Eucaryotes

Notons que l'auteur ne présente pas une étude empirique particulière, comme il le faisait dans son article de 2007. Il dresse une synthèse de différents travaux. Fabien Burki rappelle les arguments qui établirent l'hypothèse des Chromalveolata, basée sur une origine unique du

plaste secondaire comportant de la chlorophylle c à partir d'une algue rouge. Il explique ensuite les raisons de sa remise en cause et ses conséquences, relatives à l'histoire évolutive des plastes devenant plus complexe[111].

En 2013, Patrick J. Keeling rectifie, à la lueur de nouvelles études, l'histoire des plastes qu'il avait présenté en 2004. La figure 56 représente la transmission d'un plaste secondaire de façon indépendante sur au moins deux lignées : SAR et Hacrobia (en supposant ce groupe monophylétique).

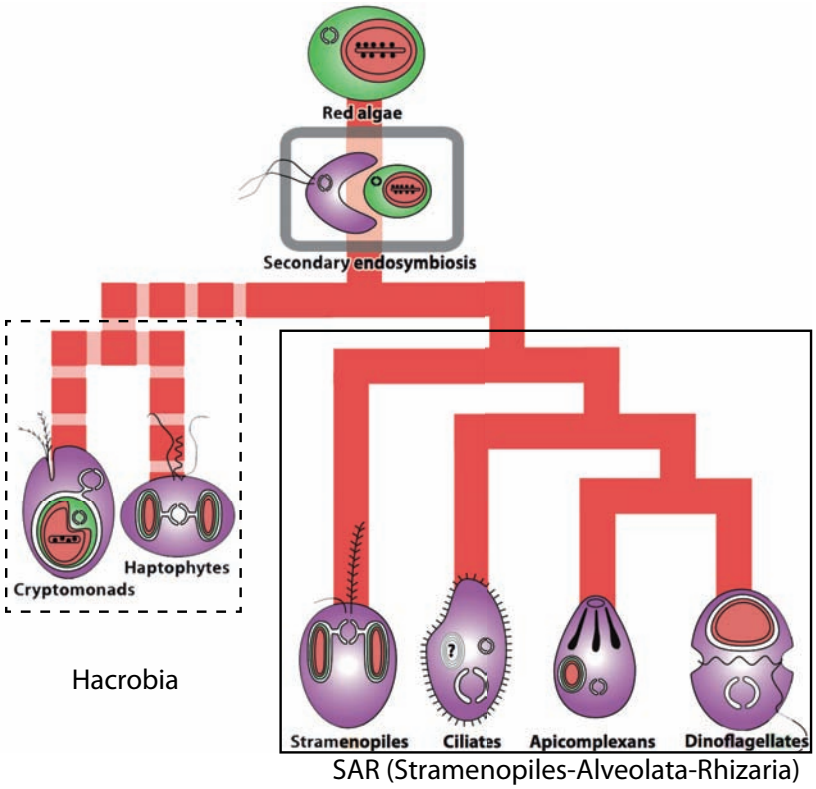


Figure 56 : origine du plaste au sein des lignées SAR et Hacrobia (en pointillé, car la monophylie des Hacrobia n'est pas très robuste). Extrait de Keeling, 2013, p. 589 (modifié)

Fabien Burki conclut son article en ouvrant des perspectives de recherche à propos de la phylogénie des Eucaryotes (Ibid., p. 11). Il dégage certaines nécessités théoriques comme l'enracinement de l'arbre par la détermination de la position de la racine, ou encore la nécessité de déterminer l'importance des transferts génétiques latéraux (ou horizontaux), liés

[111] « In phylogenetic terms, one condition of the chromalveolate hypothesis is that **both the plastid and host (i.e., nuclear) trees must be consistent** in showing the monophyly of alveolates, stramenopiles, haptophytes, and cryptomonads. (…) However, what appeared to be a consistent scenario rapidly became challenged by **the accumulating genetic data** from diverse species as well as evidence against the monophyly of its original constituents » (Burki, 2014, p. 8), *c'est nous qui soulignons.*

« Altogether, these observations have forged the basis for alternative scenarios to the chromalveolate hypothesis: scenarios in which **red plastids spread across the tree not by means of vertical inheritance, but through more complex serial eukaryote-to-eukaryote endosymbioses** (Lane and Archibald 2008; Sanchez Puerta and Delwiche 2008; Archibald 2009; Bodyl et al. 2009; Baurain et al. 2010; Dorrell and Smith 2011) » (Ibid., p. 9), *c'est nous qui soulignons.*

à l'endosymbiose plastidiale et leurs conséquences phylogénétiques. D'un point de vue empirique, il souligne la nécessité d'outils qui permettent des analyses génomiques sur des cellules isolées. Il pointe également le rôle joué par les avancées technologiques, tel que le séquençage réalisé à partir de très faibles quantités de matériel biologique.

- **Ce que sont les végétaux dans ce système**

Comme dans l'article de Keeling (2004) et Keeling *et al.* (2005) analysés précédemment, il n'y a plus de super-groupe (ou règne) nommé végétaux ('plants'). Le problème du règne végétal se trouve désormais tranché. Burki l'évoque dans sa partie introductive en critiquant les groupes « classiques » (végétaux, animaux ou champignons). Ceux-ci ne correspondent qu'à une vision étroite de la biodiversité ne permettant pas de résoudre le problème des relations phylogénétiques au sein du groupe des protistes de nature paraphylétique, donc non valides selon un cadre hennigien.

> « **Plants**, animals, and fungi are the charismatic representatives of the eukaryotic domain of life, but this narrow view does not do justice to the eukaryotic diversity » (Burki, 2014, p. 1). « Although these early proposals succeeded in recognizing several major assemblages, such as animals and **plants**, they were less successful in resolving the relationships between the groups and, with the benefit of hindsight, failed to account for the fundamental paraphyletic and complex nature of the protist lines. » (Ibid., p. 2) *, c'est nous qui soulignons.*

Le terme 'plants' se retrouve par deux fois dans la suite de l'article, nullement pour désigner l'ensemble des végétaux au sens d'un ancien règne végétal mais pour qualifier deux groupes au sein des Archaeplastida (ou Plantae) : les végétaux verts (ou Viridiplantae) et les végétaux terrestres ('land plants')[112].

En conclusion de cette section sur l'évolution récente des classifications, des changements majeurs et relativement rapides ont été décrits à propos de la taxonomie des Eucaryotes depuis la fin du XX^{e} siècle. On ne trouve plus un règne végétal unique en raison du polyphylétisme des lignées ayant acquis les plastes et, ainsi, la photosynthèse par des histoires évolutives indépendantes. Parfrey et al. (2006) expliquent que la taxonomie des grandes lignées primaires eucaryotiques est particulièrement difficile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ces auteurs soulignent l'importante difficulté de reconstruire l'histoire profonde des lignées eucaryotiques. Cela constitue un véritable challenge. De plus, la nature chimérique

[112] Les Archaeplastida comprennent notamment « **The "green" organisms (Viridiplantae) [*green plants*, *p. 6, cf.* figure 54]**, including the green algae, with mostly free-living unicellular (e.g., Chlamydomonas) and colonial or multicellular taxa (e.g., Volvox, Caulerpa), but nonphotosynthetic parasitic taxa (e.g., Prototheca, Helicosporidum), are also known, as well as the **land plants** (mosses, ferns, angiosperms, etc.) » (Ibid., p. 7), *c'est nous qui soulignons.*

des lignées eucaryotiques est une source de difficulté supplémentaire pointée par ces auteurs, ce qui nécessite d'identifier les transferts latéraux de gènes liés à l'endosymbiose et d'articuler les informations apportées par les gènes nucléaires et plastidiaux.

L'instabilité des classifications tient également à la diversité des approches théoriques de la classification, notamment dans l'acceptation (cf. Cavalier-Smith) ou non de groupes paraphylétiques.

Avec la phylogénomique, soulignons qu'un fort développement technique et méthodologique donne accès à de nouvelles données et constitue un puissant outil d'étude des relations phylogénétiques.

À présent, nous vous proposons de dresser un bilan synthétique des principaux changements taxonomiques. Il concerne les grandes divisions du vivant et leurs conséquences sur la nature du groupe des végétaux dans la systématique.

2.3. Conclusion relative à l'évolution du groupe des végétaux dans la systématique du vivant

2.3.1. Tableau synoptique

Le tableau 22 présente la vision synthétique de huit systèmes classificatoires majeurs que nous avons précédemment étudiés.

Auteurs	**Grandes divisions du vivant**	**Fondements de la classification**	**Caractérisation des végétaux**	**Groupes compris dans les végétaux**
Linné (1735 à 1768 - 12e ed.)	*Deux règnes du vivant (parmi les trois règnes de la nature)* Regna Animale et Vegetabile	Fondement fixiste et créationniste Retracer l'ordre divin de la Création	Organismes immobiles et insensibles (par opposition aux animaux)	Algues, champignons, Embryophytes (exclusion des unicellulaires, nommés « Infusoires », regroupés dans la 12e ed. de *Systema Naturae* au sein de l'espèce *Chaos infusorium* dans le règne animal, classe Vermes)
Haeckel (1866 ; 1869 ; 1880 ; 1904)[113]	*Trois règnes du vivant* (1866) Animalia, Plantae et Protista *Puis deux règnes* (1904) Histonia (Metazoa et Metaphyta) et Protista (Protozoa, Protophyta)	Phylogénie (défini par Haeckel, au sens de l'enchaînement des formes au cours du temps). Gradisme	Organismes pluricellulaires pourvus de tissus et primitivement autotrophes (« *plasmodomous* ») bien que ce mode de nutrition ait évolué dans certains groupes végétaux, comme les champignons (1880)	Algues pluricellulaires (vertes, rouges et brunes) ; champignons et lichens; Embryophytes (exclusion des unicellulaires placés dans les Protista dont les Cyanophyceae [à partir de 1869])
Copeland (1938, 1947, 1956)	*Quatre règnes du vivant* Animalia, Plantae, Monera, Protista (renommés Protoctista en 1947)	Développement de la systématique évolutionniste Gradisme	Organismes eucaryotes multicellulaires avec quatre pigments chloroplastiques (chlorophylles A et B, carotène et xanthophylle) et produisant de la cellulose et de l'amidon	Chlorophyta regroupant les algues vertes et les Embryophytes (exclusion des algues vertes unicellulaires, des algues rouges, brunes et des champignons)
Whittaker (1969)[114]	*Cinq règnes du vivant* Animalia, Plantae, Fungi, Protista et Monera	Classification évolutive et écologique acceptant les gpes polyphyl. Gradisme	Organismes eucaryotes multicellulaires photosynthétiques avec une paroi, généralement une vacuole, des pigments photosynthétiques dans les plastes	Algues pluricellulaires (vertes, rouges et brunes) et Embryophytes nommés Metaphyta (exclusion des algues unicellulaires et des champignons)

[113] Bory de St Vincent (1824), Owen (1859, 1860), Hogg (1860), Wilson & Cassin (1863) proposèrent aussi un troisième règne du vivant, différent de celui d'Haeckel, mais non présenté dans ce tableau (cf. section 2.1.2, p.164).

[114] En 1971, Margulis modifie le système à cinq règnes dans lequel les Plantae sont limitées aux seules plantes terrestres (nommées Metaphyta) puis, en 1978, Whittaker & Margulis proposent un compromis entre les deux systèmes (cf. section 2.2.4, p. 201).

Auteurs	Grandes divisions du vivant	Fondements de la classification	Caractérisation des végétaux	Groupes compris dans les végétaux
Cavalier-Smith (1981)	*Neuf règnes eucaryotiques et deux super-règnes*[115] *(Eukaryota et Prokaryota) avec six règnes*[*] Eufungi et Ciliofungi (Fungi[*]) ; Animalia[*] ; Protozoa et Euglenozoa (Protista[*]) ; Viridiplantae et Biliphyta (Plantae[*]) ; Cryptophyta et Chromophyta (Chromista[*]) ; Bacteria[*] (unique règne des Prokaryota)	Phylogénie avec acceptation des groupes paraphylétiques mais rejet des groupes polyphylétiques Gradisme	Quatre règnes végétaux séparés, pouvant être regroupés en deux règnes végétaux : Viridiplantae et Biliphyta (Plantae), Cryptophyta et Chromophyta (Chromista). Végétaux : quatre lignées formés des eucaryotes photosynthétiques, après avoir enlevé les Euglenophyta et Dinophyta en raison de leur phagotrophie et de leur relation avec les autres Protozoa.	Il n'y a plus un règne végétal mais deux ou quatre ('four plant kingdoms') Ces quatre règnes végétaux comprennent les algues unicellulaires et pluricellulaires (à l'exclusion des Euglenophytes et Dinophytes, classées dans les Protozoa) et les plantes terrestres (nommées Bryophyta et Tracheophyta) Nomenclature : application du code botanique aux Fungi, Plantae et Chromista
Cavalier-Smith[116] (1998, 2004)	*Deux empires (Eukaryota et Prokaryota) et six règnes du vivant* Bacteria, Protozoa, Animalia, Fungi, Plantae et Chromista	Phylogénie avec acceptation des groupes paraphylétiques avec opposition explicite au cladisme. Gradisme	Cavalier-Smith ne parle plus de règnes végétaux comme en 1981 dans sa phylogénie. Cependant dans un contexte de nomenclature, il parle de trois règnes botaniques : Plantae, Fungi, Chromista pour lesquels utiliser l'ICBN (International Code of Botanical Nomenclature)	Sur le plan phylogénétique, Cavalier-Smith ne parle plus des végétaux. Sur le plan de la nomenclature botanique, il inclue au sein des trois « botanical kingdoms » : les champignons, les plantes terrestres (nommées Cormophyta) et les algues (à l'exclusion des Euglenophytes et Dinophytes, classées dans les Protozoa)

[115] Woese propose que la première division du vivant distingue Eucaryotes, Archaebacteria (ou Archaea) et Eubacteria (ou Bacteria). Ces trois divisions majeures du vivant ont été appelées « primary kingdoms » ou « urkingdoms » par Woese & Fox (1977) et Woese (1987) puis domaines du vivant en 1990.

[116] Le système à huit règnes de Cavalier-Smith (1993) n'est pas figuré ici (cf. p. 216); il comprend deux règnes procaryotiques et six règnes eucaryotiques dont le règne Archeozoa qu'il inclura en 1998 au sein des Protozoa.

Auteurs	Grandes divisions du vivant	Fondements de la classification	Caractérisation des végétaux	Groupes compris dans les végétaux
Articles de 2004 à 2014 portant exclusivement sur la classification des Eucaryotes				
Adl *et al.* (2005)[1] Keeling *et al.* (2005)[2], similaire à Keeling, 2004	*Cinq*[2] *ou six*[1] *super-groupes eucaryotiques* Archaeplastida[1] (Plantae[2]), Chromalveolata, Rhizaria, Excavata, Amoebozoa[2], Opisthokonta[2] (regroupés au sein des 'Unikonts'[2])	Phylogénie avec refus de groupes paraphylétiques (fondements hennigiens)	Le groupe des végétaux n'existe pas dans la phylogénie. La plupart des super-groupes eucaryotiques comprennent des organismes avec des plastes, dont l'histoire évolutive est complexe (nombreux évènements d'endosymbiose indépendants)	Sans objet
Burki (2014)	*Plusieurs super-groupes eucaryotiques* Archaeplastida (ou Plantae), SAR (Stramenopiles Alveolates Rhizaria), Excavata, Amoebozoa, Opisthokonta et autres groupes dont la place est discutée (Haptophytes, Cryptophytes, etc.)	Phylogénie avec refus de groupes paraphylétiques (fondements hennigiens) Phylogénomique	Idem	Idem

Tableau 22 : évolution des grandes divisions taxonomiques du vivant et de la nature du groupe des végétaux (synthèse non exhaustive)

Le nombre de grandes divisions taxonomiques varie de façon conséquente. Il s'élève en effet à deux règnes du vivant dans le système linnéen, au XVIII^{e} siècle, et à dix règnes dans la classification de Tom Cavalier-Smith, en 1981. Cette dernière comprend un règne procaryotique et neuf règnes eucaryotiques, dont quatre qualifiés de végétaux par l'auteur. La nature du groupe des végétaux diffère fortement d'une classification à l'autre de façon corrélée au nombre de règnes. Dans les classifications les plus récentes (2005, 2014), il n'est plus question des végétaux qui ne forment pas un groupe systématique valide en raison de leur polyphylétisme et de l'acquisition indépendante de plastes.

Les fondements philosophiques et théoriques constituent un élément essentiel façonnant les classifications. À l'exception de Linné, les systèmes classificatoires présentés dans ce tableau ont été élaborés dans un cadre de pensée évolutionniste, mais traversé par un débat sur la relation entre classification et phylogénie. Ernst Haeckel, en 1866, propose le terme de phylogénie mais dans un sens différent de celui défini par Willi Hennig (1950/1966), le fondateur de la systématique phylogénétique ou cladistique. Pour le premier la phylogénie correspond à l'enchaînement des formes de façon généalogique. Pour le second, la phylogénie se concentre sur les relations de parenté entre les organismes et laisse les ancêtres à l'état d'hypothèse. Seuls les arbres mobilisant les fondements hennigiens s'émancipèrent de la pensée gradiste.

Si les classifications phylogénétiques étudient fondamentalement le problème des relations évolutives entre les différentes lignées du vivant, l'étude historique révèle que les problèmes étudiés par les différents systématiciens changeront selon les connaissances disponibles à chaque époque. Ainsi, en proposant le règne Protista, Haeckel se focalise sur le problème de la place des organismes unicellulaires que le système à deux règnes ne prenait pas en compte. Il s'est beaucoup questionné sur le problème de l'origine de la vie et le rôle des Monera (classés parmi les Protista), qu'il considère comme les formes primitives à l'origine des animaux et des végétaux. En séparant les Monera des Protista dans un quatrième règne, Copeland (1938) s'intéresse particulièrement au problème de la place des organismes dépourvus de noyau qu'il considère comme les descendants les plus proches de la première forme de vie apparue sur Terre. Quant à Whittaker (1969), la proposition de son système à cinq règnes repose sur des grades définis sur des bases structurales et fonctionnelles (nutritives et écologiques) dont il considère qu'elles sont le reflet des grandes directions évolutives. Mais le fait qu'il accepte des groupes polyphylétiques indique que le problème premier qui fonde son système n'est pas phylogénétique. Les classifications étudiées entre 1981 et 2014 répondent, quant à elles, à un problème phylogénétique, mais avec un

positionnement radicalement différent concernant l'acceptation ou non des groupes paraphylétiques. Le débat concernant l'acceptation de groupes paraphylétiques s'est poursuivi longtemps, mais la position de Cavalier-Smith est devenue largement minoritaire aujourd'hui parmi les systématiciens. Déterminer les relations phylogénétiques du vivant permet de proposer des scénarii concernant l'évolution des caractères, comme les plastes.

Par ailleurs, le type de données pris en compte pour classer, en relation avec les techniques disponibles, est un facteur jouant sur les changements taxonomiques. Les données cellulaires et moléculaires prenent une place de plus en importante et elles contribuent fortement à l'étude des relations phylogénétiques impliquant les Eucaryotes unicellulaires.

Enfin, soulignons que les méthodes de reconstruction phylogénétique ont également beaucoup évolué depuis les années 1970. Elles constituent l'un des facteurs déterminants qui contribuent aux changements taxonomiques.

2.3.2. Évolution du terme Plantae

Le terme Plantae a beaucoup évolué depuis son utilisation par Haeckel en 1866.

Pour cet auteur, ce groupe rassemble les organismes pluricellulaires pourvus de tissus et primitivement autotrophes (qu'il nommait « *plasmodomous* »), bien que ce mode de nutrition ait évolué dans certains groupes végétaux, comme les champignons. Le groupe Plantae a alors une large extension puisqu'il comprend les algues pluricellulaires, les champignons, les lichens et les plantes terrestres mais il exclut les organismes unicellulaires placés dans le règne Protista. Les Cyanophyceae changèrent de position systématique en quittant le règne Plantae pour les Protista à partir de 1869.

Pour Copeland (1938), Whittaker (1969) et Margulis (1971), le groupe Plantae était encore l'unique règne végétal de leur système de classification, mais avec une délimitation différente dans chaque cas (cf. tableau 22).

Avec Cavalier-Smith (1981), le groupe Plantae n'est plus que l'un des deux règnes végétaux, qu'il distingue des Chromista. Les Plantae possèdent un plaste à deux membranes.

Aujourd'hui, le terme Plantae reste toujours utilisé par les systématiciens mais, suivant les auteurs, dans des sens différents. Par exemple, Adl *et al.* (2005, 2012) restreignent l'usage du terme Plantae aux plantes terrestres (Embryophyta). Ils utilisent le terme d'Archaeplastida en lieu et place de ce que Cavalier-Smith nommait Plantae (organismes avec un plaste à deux membranes), comme l'indique la citation suivante :

> « the **Archaeplastida**, grouping the Glaucophyta, red algae, green algae, and **Plantae** » (2005b, p. 400)*, c'est nous qui soulignons.*

D'autres auteurs utilisent le terme Plantae dans le sens de Cavalier-Smith comme synonyme du super-groupe Archaeplastida (2014; 2004, 2013; 2005; Simpson & Roger, 2004).

Cette différence d'usage passé et actuel du terme Plantae en systématique nous fait dire, à la suite de Palmer *et al.* (2006), qu'il s'agit d'un cas extrême de polysémie, source d'une difficulté potentielle pour les non-spécialistes. Nous chercherons à en étudier l'importance à l'occasion de notre reconstruction didactique (cf. chapitre 4).

L'étude des changements taxonomiques pendant les deux derniers siècles nous conduit maintenant à poser notre regard sur les modes de raisonnement qui peuvent se constituer comme obstacle épistémologique.

3. Les obstacles épistémologiques et leur influence dans la systématique

À la suite de Gaston Bachelard et Georges Canguilhem, nous souhaitons caractériser à partir de cette étude historique tous les obstacles épistémologiques qui ont été travaillés et dépassés par les communautés scientifiques durant les deux derniers siècles de l'histoire de la systématique.

> « La notion d'*obstacle épistémologique* peut-être étudiée dans le développement historique de la pensée scientifique et dans la pratique de l'éducation. Dans l'un et l'autre cas, cette étude n'est pas commode. L'histoire, dans son principe, est en effet hostile à tout jugement normatif. Et cependant, il faut bien se placer à un point de vue normatif, si l'on peut juger de l'efficacité d'une pensée. Tout ce qu'on rencontre dans l'histoire de la pensée scientifique est bien loin de servir effectivement à l'évolution de cette pensée. Certaines connaissances même juste arrêtent trop tôt des recherches utiles. L'épistémologue doit donc trier les documents recueillis par historien. Il doit les juger du point de vue de la raison évoluée, car c'est seulement de nos jours, que nous pouvons pleinement juger les erreurs du passé spirituel. (…) Un fait mal interprété par une époque reste un *fait* pour l'historien. C'est, au gré de l'épistémologue, un *obstacle*, c'est une contre-pensée. » (Bachelard, 1938/1993, p. 17)

Chercher à identifier des obstacles épistémologiques dans l'histoire des savoirs scientifiques, nécessite d'endosser momentanément l'habit neuf de l'épistémologue.

Il nous semble important d'identifier le contexte historique dans lequel une idée, un mode de raisonnement s'est actualisé et, rétrospectivement, a pu constituer un obstacle épistémologique.

Enfin, en voulant mettre l'accent sur les systèmes classificatoires élaborés dans un cadre évolutionniste, nous n'aborderons pas, ici, l'obstacle de la pensée créationniste[117] qui sera surmonté au cours du XIX^{e} siècle.

Nous étudierons les modes de raisonnement identifiés dans l'enquête didactique (cf. chapitre 2), ce qui nous permettra d'examiner s'ils peuvent se retrouver, d'une façon ou d'une autre, dans l'évolution des classifications et, également, de quelle façon ils se sont instanciés historiquement. Cette présentation successive peut donner - à tort sans doute - l'impression d'une indépendance de ces modes de raisonnement pouvant être impliqués de façon conjuguée dans une même classification.

3.1. La pensée catégorielle

[117] « le progrès scientifique marque ses plus nettes étapes en abandonnant les facteurs philosophiques d'unification facile tel que l'unité d'action du Créateur, l'unité de plan de la Nature, l'unité logique » (Bachelard, 1938, p. 16).

La pensée catégorielle consiste à construire des couples notionnels par une opposition binaire (1993). La classification duale du monde vivant nous semble relever de ce mode de raisonnement. La séparation des êtres vivants en deux règnes a longtemps pesé sur la classification des organismes microscopiques qui devaient entrer dans l'une ou l'autre des catégories taxonomiques. Ainsi les Infusoires ont été classés par Linné, Buffon et Lamarck parmi les animaux, en raison de leur mobilité (« animalcules ») même pigmentés, i.e. chlorophylliens (cf. p. 163). L'existence d'organismes qui entraient mal dans cette dualité du vivant conduisit à la création du groupe des Zoophytes au sein du règne animal puis, au cours du XIX^{e} siècle, poussera à la création d'un troisième règne du vivant.

Cependant, l'introduction d'un troisième règne du vivant n'a pas totalement mis fin au recours à la pensée catégorielle distinguant animaux et végétaux. Cette dualité entre les deux mondes fut utilisée par Ernst Haeckel au sein de taxons plus vastes. Dans son ouvrage *History of Creation* (1892, 6^{e} éd., vol.2, p. 67 et 72, cité par Sapp, 2009), il distingue deux types de Monera : les Phytomonera (*vegetable monera*) et les Zoomonera (*animal monera*). Plus tard, Haeckel (1904) proposera un système à deux règnes. Le premier niveau de dualité se traduit par la distinction entre Protista (unicellulaires) et Histonia (pluricellulaires), sur la base de l'organisation cellulaire. Chaque règne comprend une nouvelle organisation duale basée sur le mode de nutrition et distinguant Protozoa et Protophyta, d'une part, et Metazoa et Metaphyta, d'autre part. Nous sommes à nouveau face à un exemple de pensée catégorielle qui envisage la biodiversité de façon dichotomique. Une autre division binaire majeure a été introduite dans la première moitié du XX^{e} siècle. Elle distingue les organismes nucléés (Eucaryotes) des organismes dépourvus de noyau (Monera puis Procaryotes). Une telle division du vivant sera remise en cause par Woese (1987) puis par Woese *et al.* (1990). Ceux-ci proposent une organisation en trois domaines du vivant (Archaea, Bacteria, Eucarya). Nous avons présenté brièvement les contours de cette controverse et les oppositions de E. Mayr et T. Cavalier-Smith. La conception gradiste attachée aux niveaux d'organisation a fortement pesé. Mais il n'est pas impossible que la pensée catégorielle ait joué, valorisant ainsi une opposition par couple. Toutefois, cette suggestion reste largement hypothétique. Il conviendrait de conduire une analyse de l'argumentation des opposants au système tripartite de Woese, de manière à étayer ou, au contraire, à infirmer cette hypothèse d'école.

3.2. Le macrocentrisme

Dans notre précédente étude didactique (cf. chapitre 2), nous avions suggéré de qualifier de macrocentrisme le raisonnement consistant à se focaliser sur les organismes macroscopiques au détriment des micro-organismes. Peut-on trouver une actualisation, ou instanciation, historique de ce type de raisonnement ?

La place des micro-organismes a été très largement minorée dans le développement de la systématique au XX^e^ siècle. La systématique évolutionniste s'est construite sans microbiologiste[118]. Dans l'ouvrage collectif dirigé par Julian Huxley, *The New Systematics* (1940), aucun microbiologiste ne figure parmi les 22 contributeurs. Quarante plus tard, Ernst Mayr, célèbre évolutionniste, co-édita en 1980 *The Evolutionary Synthesis* puis, en 1982, *Growth of Biological Thought*[119]. Ces deux ouvrages ne contiennent que quelques références inconsistantes sur les micro-organismes. Seules quatre pages de son ouvrage *Histoire de la biologie* restent consacrées aux micro-organismes (Sapp, 2009, p. 269-270). Faire des protistes un règne est, selon lui, une « question de goût »…

Cependant, E. Mayr changera d'avis huit ans plus tard, à propos de l'importance à accorder aux bactéries et aux protistes. Suite à la publication de Woese *et al.* (1990), Mayr rehaussa alors les Protista au rang de sous-domaine[120].

Le célèbre paléontologue et évolutionniste américain Stephen Jay Gould (1941-2002) rédige, en 1996, un article de presse intitulé *Planet of The Bacteria*. Il explique que les bactéries constituent la plus grande diversité taxonomique du vivant ainsi que la plus forte part de la biomasse. Elles sont ubiquistes et seraient apparues trois milliards d'années avant les animaux multicellulaires. Autrement dit, nous vivons dans un monde bactérien. Pourtant, ne rendons-nous pas davantage honneur aux organismes multicellulaires ? Notre arrogante cécité à l'égard des micro-organismes est interprétée par S. J. Gould comme un effet d'échelle[121]. Ne

[118] Sapp (2009, p. 80)

[119] Traduit en français en 1989 sous le titre : *Histoire de la biologie. Diversité, évolution et hérédité.*

[120] « As far as the domain of the Eukaryota is concerned, instead of recognizing the customary four kingdoms, it might be advisable to recognize **two subdomains** on the basis of grade of organization, the largely unicellular Protista and the multi-cellular `Metabionta', containing the Fungi, Metaphyta and Metazoa. » (Mayr, 1990, p. 391)*, c'est nous qui soulignons.*

[121] « Fair enough, if we wish to honor multicellular creatures, but we are still not free of the **parochialism of our scale**. If we must characterize a whole by a representative part, we certainly should honor life's constant mode. We live now in the "Age of Bacteria." Our planet has always been in the "Age of Bacteria," ever since the first fossils—bacteria, of course—were entombed in rocks more than 3 billion years ago. On any possible, reasonable or fair criterion, bacteria are—and always have been—the dominant forms of life on Earth. **Our failure to grasp this most evident of biological facts arises in part from the blindness of our arrogance but also, in large measure, as an effect of scale. We are so accustomed to viewing phenomena of our scale—sizes measured in feet and ages in decades - as typical of nature** » (Gould, 1996)*, c'est nous qui soulignons.*

sommes-nous pas surentraînés à observer principalement des phénomènes à notre échelle spatiale et temporelle ?

L'analyse de Gould semble faire écho à ce que nous nommons le macrocentrisme, en lien avec l'obstacle nommé *« primat de la perception sur la conceptualisation »* par Jean-Pierre Astolfi et Brigitte Peterfalvi (1993, p. 109).

De façon rétrospective, Gould compare l'importance phylogénétique relative des bactéries et des Eucaryotes multicellulaires. Au sein de l'arbre universel du vivant avec ses trois domaines (Woese, 1987), les trois lignées multicellulaires, Plantae, Animalia et Fungi (Whittaker, 1969) semblent de petites « branchettes »…

La figure 57 représente la comparaison des deux arbres du vivant avec vingt ans d'écart. Elle illustre le franchissement de l'obstacle macrocentriste par C. Woese, un franchissement que S. J. Gould, en 1996, appelle de ses vœux.

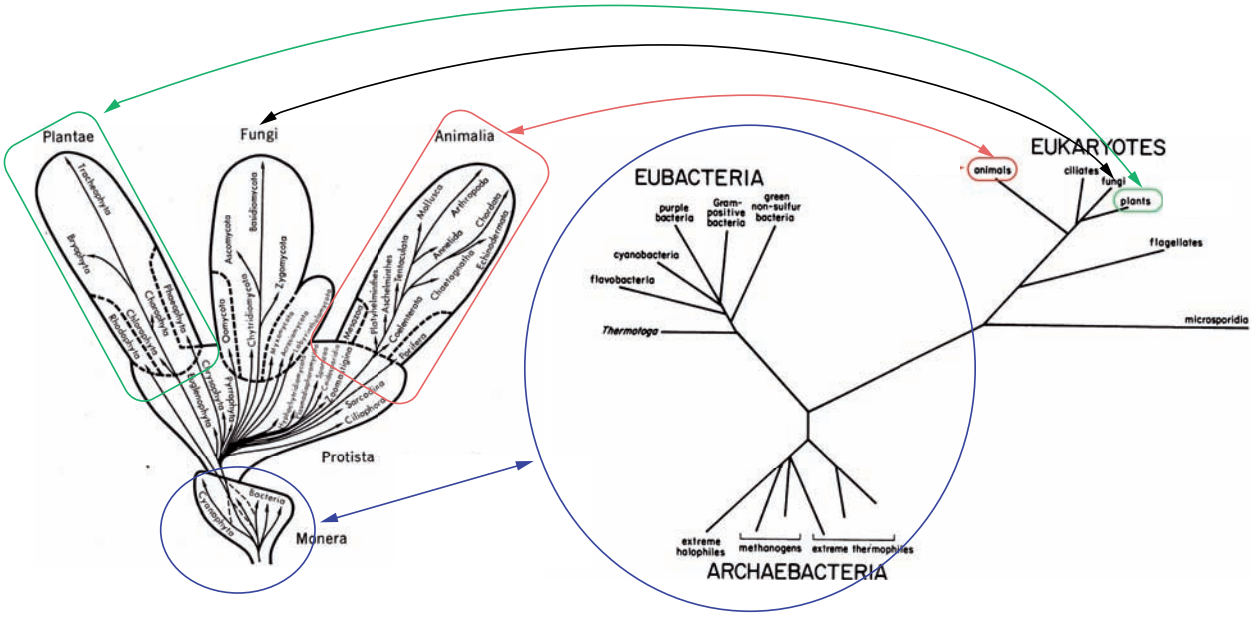


Figure 57 : comparaison de l'importance relative des différents groupes dans les arbres de Whittaker (1969), à gauche, et Woese (1987), à droite.

Outre une majoration de l'importance des organismes multicellulaires macroscopiques, les règnes Monera et Protista sont représentés par Whittaker de façon hiérarchique, renvoyant à une pensée gradiste que nous allons présenter dès à présent.

3.3. Le gradisme

La pensée gradiste s'attache à définir des paliers d'organisation structurale et fonctionnelle, hiérarchisés selon des degrés de perfection. Armand de Ricqlès nous explique que ce mode de pensée gradiste maintient dans un contexte évolutionniste la conception scaliste de la nature.

> « Ensuite, le grade maintient subtilement en place, chez Darwin et dans l'évolutionnisme des XIX^e^ et XX^e^ siècles, y compris sous le manteau de la « Nouvelle systématique », une conception scaliste de la nature. Le grade s'inscrit directement, en effet, dans la vision transformiste globale quelque peu linéaire de Lamarck et, en deçà d'elle, dans des strates encore plus anciennes de la pensée occidentale, cristallisées par la conception linéaire et continue de l'échelle des êtres, si bien formulée par Leibniz. **Il est troublant de constater à quel point la *scala naturae* est affine à la situation du grade, chaque grade constituant un barreau de l'échelle**. » (de Ricqlès, 1996, p. 10), *c'est nous qui soulignons*.

L'Échelle des Êtres, ou *Systema Naturae*, était déjà présente chez Platon et Aristote. Elle a également été développée par Gottfried Wilhelm Leibniz, au XVII^e^ siècle, dans un contexte fixiste.

La pensée gradiste est en rapport avec le mythe du progrès dénoncé par S. J. Gould (1997). Celui-ci (1995, p. 171) explique que « la plupart des penseurs victoriens identifiaient en effet le changement biologique au progrès et le mot « évolution » propulsé en biologie par les plaidoyers de Herbert Spencer signifiant « progrès » (littéralement « déploiement ») dans l'anglais vernaculaire. Au début, Darwin refusa ce mot parce que sa théorie ne contenait aucune notion d'amélioration générale en tant que conséquence prévisible d'un mécanisme de mutations. » (cité par Peterfalvi, 2008, p. 115).

Afin d'examiner les indices de la mobilisation d'un tel mode de raisonnement, nous reprendrons l'analyse historique des quatre auteurs non cladistes : Haeckel, Copeland, Whittaker et Cavalier-Smith,.

3.3.1. Le gradisme chez Haeckel

Ernst Haeckel envisage de façon gradiste que le règne végétal augmenterait en diversité et en perfection au cours de l'histoire de la Terre, à partir d'un groupe inférieur et imparfait, les algues. Les champignons sont présentés comme issus des végétaux (par changement des conditions nutritives). Les Phycomycetes seraient issus des algues Siphonae.

Ces descriptions impliquent une conception généalogique (« qui descend de qui » ?) plutôt que phylogénétique au sens moderne (« qui est plus proche de qui ? »). Nous rappelons que le terme phylogénie fut introduit par cet auteur. Il y a donc, ici, une confusion entre la phylogénie au sens haeckelien, traduisant une relation généalogique, et la phylogénie au sens heinnigien.

Dans les arbres du vivant réalisés en 1866 (cf. figure 31, p. 170), les différentes branches n'ont pas toutes la même hauteur. Par exemple, au sein du règne Plantae, ce sont les Cormophyta (plantes terrestres) qui sont représentées au sommet de l'arbre. À la lueur des

citations précédentes et dans l'esprit d'Haeckel, cela pourrait être interprété comme le reflet d'un degré de complexité plus élevé. Mais ces deux arbres présentent cependant d'importantes différences avec l'arbre généalogique de l'Homme (cf. figure 58), publié en langue allemande, en 1874, dans l'ouvrage *Anthropogenie; oder, Entwickelungsgeschichte des menschen* et traduit en français, en 1877.

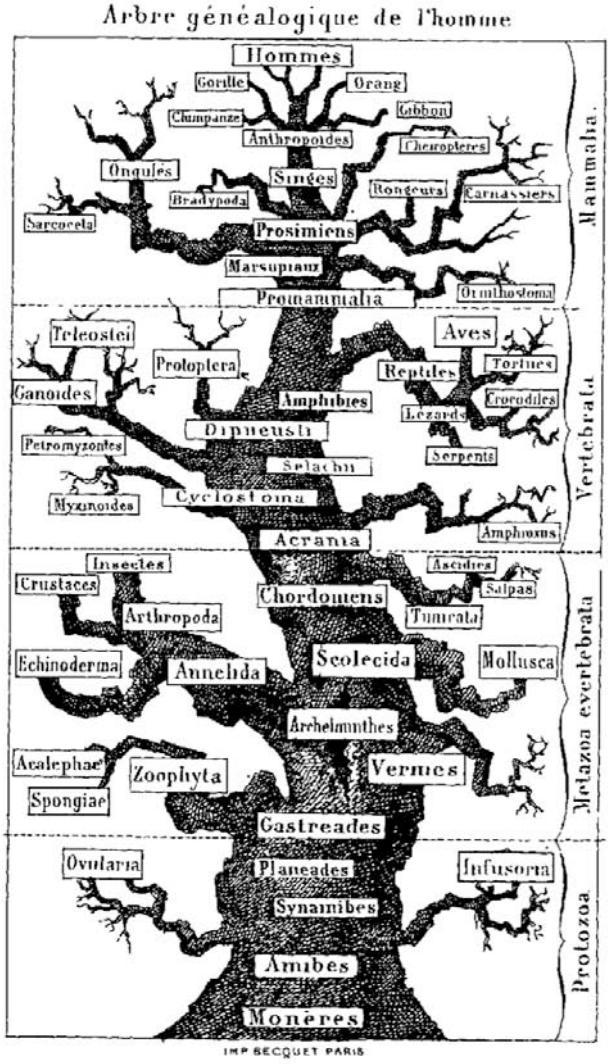


Figure 58 : arbre généalogique ('stammbaum') de l'Homme. Reproduit de Haeckel (1877), traduit par C. Letourneau (version originale parue en 1874).

Benoît Dayrat (2003) explique qu'il s'agit du seul arbre représenté par E. Haeckel avec un large tronc. Dans les arbres de 1866 que nous avons commentés précédemment, il y avait plusieurs branches et non un tronc unique. Dans ce cas de figure, des noms de groupes s'enchaînent linéairement sur le tronc (Monères, Amibes, …) jusqu'à l'Homme au sommet.

B. Dayrat (2003) et G. Lecointre (2009a) l'interprètent comme la manifestation graphique de sa conception gradiste à travers une succession d'étapes morphologiques[122].

Il nous semble important d'indiquer que l'idée de progrès attachée à la pensée gradiste n'est pas, en elle-même, un obstacle dans l'absolu : « c'est la dynamique dans laquelle elle s'insère qui l'est » nous rappelle Brigitte Peterfalvi (2008, p. 111). L'idée de progrès aurait pu constituer un facteur d'acceptation de la théorie de l'évolution et donc d'émancipation par rapport au fixisme. Mais le gradisme limite la compréhension de l'évolution qui n'est pas orientée comme le sous-tend l'idée de progrès.

> « C'est cette idée qui, historiquement, a permis l'émancipation par rapport au fixisme lié aux textes religieux. C'est aussi celle qui limitera la compréhension de la théorie darwinienne, en la considérant comme explicative de ce progrès par une adaptation aux milieux successifs que les espèces traversent. » (Ibid., p. 111)

Comment s'actualise la pensée gradiste chez H.F. Copeland, développant son système dans le cadre de l'émergence de la théorie synthétique de l'évolution ?

3.3.2. Le gradisme chez Copeland

L'arbre phylogénétique proposé par Herbert F. Copeland possède une forme très originale (cf. figure 36, p. 186). Les groupes sont représentés par des branches en trois dimensions, sans relation d'ancêtre à descendant (de type généalogique).

Cependant, quelques indices révèlent l'idée d'une hiérarchie entre les groupes comme les termes supérieur ou inférieur.

> « The limits of the plant kingdom are those which will include the two groups Chlorophyceae (green algae) and Embryophya (**higher** plants). » (Copeland, 1938, p. 412) «The **lowest** group in the plant kingdom as here construed is the order Volvocales »

Par ailleurs, si la figure ne montre pas de relations d'ancêtre à descendant entre groupes actuels, il envisage les algues vertes unicellulaires du groupe des Volvocales, comme étant le groupe ancestral des végétaux (Ibid., p. 416).

Soulignons enfin la caractérisation qu'il propose du règne Protista, défini par l'absence des caractéristiques des végétaux et des animaux, qui renvoit au concept de grade en tant que

[122] « Mais Dayrat (2003) montre que si Haeckel a pour maîtres à penser Lamarck, Goethe et Darwin, sa phylogénie tient plus de Goethe et de Lamarck que de Darwin. En effet, la phylogénie de Haeckel ne montre des successions, **des enchaînements que sur son tronc, ses branches latérales étant dépourvues de manifestations**. Non seulement le tronc est le seul segment qui vaille qu'on y montre quelque chose, mais ce qui s'y passe n'est pas une généalogie d'espèces, mais une **succession de morphologies** (parfois celle d'un seul organe) par lesquelles une « chaîne de progéniteurs » est passée. Si l'on retire les branches latérales qui ne font office que d'ornements, l'arbre de Haeckel n'est qu'une **série linéaire d'étapes morphologiques majeures le long de la descendance menant à une espèce donnée**, donc sur le tronc menant à cette espèce. Les branches latérales n'étant qu'illustratives, l'arbre de Haeckel tient plus du **scalisme idéaliste** que d'une véritable généalogie. » (Lecointre, 2009a, p. 302-303), *c'est nous qui soulignons*.

niveau d'organisation : « lacking the combinations of characters to be listed as characteristic of plants and animals » (p. 416).

Portons à présent notre attention sur le système à cinq règnes de R.H. Whittaker.

3.3.3. Le gradisme chez Whittaker

La pensée gradiste est très présente chez R. H. Whittaker. À de nombreuses reprises, il utilise l'idée que son système à cinq règnes se base sur des niveaux d'organisation et des directions de l'évolution permettant de définir des trois règnes supérieurs.

L'arbre qu'il nous propose représente, de façon hiérarchique, les cinq groupes avec les Monera en bas, les Protista au milieu et les trois règnes multicellulaires (ou multinucléés) en haut. Chaque lignée se positionne à une hauteur déterminée de l'arbre. Ainsi les Bryophyta arrivent moins haut que les Tracheophyta, traduisant leur degré croissant de complexité. Cependant, il ne place aucun groupe actuel sur les flèches en position intermédiaire.

L'apologie des grades proposés par R.H. Whittaker sera réalisée par Ernst Mayr vingt ans plus tard dans la revue Nature (1990)[123].

Pour finir notre analyse de l'actualisation du gradisme dans les différents systèmes étudiés, portons notre attention sur les articles de Tom Cavalier-Smith.

3.3.4. Le gradisme chez Cavalier-Smith

Afin de comprendre comment T. Cavalier-Smith se positionnait en 1981, par rapport au débat entre cladistique et systématique évolutionniste, nous avons déjà été amenés à discuter de la position gradiste de Cavalier-Smith (cf. p. 208-211). Cet auteur refuse les groupes polyphylétiques de Whittaker, mais il accepte les groupes paraphylétiques. Les figures qu'il nomme phylogénies, représentent des groupes actuels en position intermédiaire et comprennent une direction évolutive clairement identifiée par des flèches (cf. figure 44, p. 208). Bien qu'il déclare rejeter les grades d'organisation (Cavalier-Smith, 1981, p. 478), il utilise néanmoins l'idée de complexité croissante, de direction évolutive ou, encore, d'organismes « primitifs » pour désigner des organismes et non des caractères. Cependant, il

[123] « Everyone realizes that the Protista are as heterogeneous a lot (or more so) as the three kingdoms of the Metabionta together. I have little doubt that the specialists will in due time break them up into a considerable number of kingdoms, but by recognizing the subdomain Protista one emphasizes that these organisms represent a **definite evolutionary grade**, a **definite stage in the development** of the derived multicellular Metabionta. (…) A basic classification of the living world will be used not only by specialists but also by nontaxonomists and lay people. They will be more comfortable with the classical concept of classification with its recognition of **the traditional grouping of protists, fungi, metaphytes and metazoans**. **Grade of evolutionary development**, as well as **organizational similarity**, are stressed in this arrangement, which also agrees with the traditional information-retrieval» (Mayr, 1990, p. 491), *c'est nous qui soulignons.*

précise aussitôt en définissant l'organisme primitif comme doté de nombreux caractères ancestraux (Ibid., p. 472).

Avec la cladistique, les classifications s'émancipent de cette pensée gradiste. Les arbres ne sont plus orientés, voire-même de forme circulaire (cf. figure 54, p. 228).

En conclusion, le gradisme constitue un mode de pensée très fréquent en taxonomie jusqu'au développement des classifications phylogénétiques, au sens hennigien. En mobilisant l'idée de progrès, le gradisme transporte avec lui une valeur étrangère à la pensée scientifique et qui est particulièrement tenace « puisqu'elle réussit à se glisser dans les conceptions évolutionnistes elles-mêmes » (Petefalvi, 2008, p. 117). Ce mode de raisonnement se combine fréquemment avec le finalisme, consistant à attribuer une finalité à l'évolution conduisant à l'apparition des groupes « supérieurs », tels que les plantes à fleurs, les Mammifères dont l'Homme.

Un autre mode de raisonnement pouvant se poser en obstacle dans certaines situations est l'essentialisme, dont nous avons soupçonné le recours pour l'orobanche et la souris (cf. chapitre 2). L'essentialisme a-t-il une influence sur l'histoire des classifications ?

3.4. L'essentialisme

Étudier l'influence historique de l'essentialisme implique d'envisager la question de l'opposition entre essentialisme et nominalisme, qui constitue un vaste débat philosophique dont nous n'avons pas la prétention d'en dresser tous les contours. Nous entendons définir seulement ce couple philosophique et montrer qu'il n'est pas indépendant d'une autre opposition majeure : celle qui oppose réalisme et idéalisme.

La question de la réalité des taxons fut largement discutée au cours de l'histoire de la systématique. Nous pointerons, de façon succincte, la diversité des positions des systématiciens principalement dans le cadre de la systématique évolutionniste.

Nous discuterons enfin de l'idée très répandue qui considère les systématiciens prédarwinistes comme étant essentialistes. La remise en cause récente de cette thèse par Mary P. Winsor nous permettra de clarifier ce qu'est l'essentialisme et de discuter de son impact historique.

3.4.1. Nominalisme vs essentialisme

> « La réalité du monde vivant est celle d'individus sur lesquels nous plaquons des conventions de langage. L'espèce n'est qu'une collection monophylétique d'individus, définie au mieux par une synapomorphie, au pire par la moyenne et la variance de paramètres mesurés » (Lecointre & Le Guyader, 2001, p. 18)

G. Lecointre et H. Le Guyader mobilisent, ici, une approche philosophique réaliste du monde vivant qui existe indépendamment de notre perception. Mais ce sont les organismes qui constituent la réalité du monde vivant alors que les groupes taxonomiques, qu'il s'agisse de l'espèce ou de taxons de rang plus élevé, sont des constructions humaines. Concernant l'espèce, il existe plusieurs façons de construire le concept d'espèce : une première de nature phylogénétique et une seconde de nature « statistique » (moyenne de différents traits phénotypiques). Dans les deux cas, il s'agit d'une élaboration conceptuelle selon une méthode et des critères que l'on se donne et qui reste rectifiable. Il n'existe pas un unique concept de l'espèce mais une multiplicité. L'espèce est nommée de façon vernaculaire et de façon plus unitaire par le taxonomiste, dont une part importante de l'activité de celui-ci reste la nomenclature, cette dernière s'étant dotée de règles internationales (cf. les codes de nomenclature dont nous avons parlé précédemment, p. 45). C'est à cette « convention de langage » que correspond l'approche nominaliste, définie par G. Lecointre :

> « Le nominalisme consiste à considérer que les concepts sont des constructions humaines et que les noms qui s'y rapportent ne sont que conventions de langage. Les êtres ne sont pas intrinsèquement porteurs des concepts par lesquels nous les appréhendons » (Lecointre, 2009b, p. 24).

Cette approche nominaliste reste celle de « la plupart des phylogénéticiens pratiquant l'analyse cladistique (…) et qui a été celle de Darwin, aux antipodes de l'essentialisme » (Lecointre & Le Guyader, 2001, p. 18).

G. Lecointre définit ainsi l'essentialisme :

> « L'essentialisme consiste à penser que les objets naturels sont intrinsèquement porteurs d'une essence idéelle qui les transcende. L'idée, ou les concepts, ont une existence indépendante qui préexiste aux objets auxquels ils se rapportent » (2009b, p. 18).

Lucien Sève, philosophe d'inspiration marxiste, précise que cette tradition philosophique considère que « l'essence existe objectivement comme réalité spirituelle à part des choses » (Sève, 1980, p. 676). Ce qui renvoie à un idéalisme philosophique, idéalisme en rupture avec le matérialisme méthodologique de l'activité scientifique.

L'essentialisme et la pensée typologique entretiennent des relations que nous nous proposons de clarifier ultérieurement (cf. p. 251).

Lucien Sève (Ibid., p. 695), quant à lui, envisage le nominalisme comme la « réduction de l'idée générale, du concept à un nom ». Mais un tel raisonnement qui consiste à penser que les concepts ne sont que des mots indépendants de toute réalité biologique, pourrait conduire à un autre écueil de la pensée, une autre forme d'obstacle idéaliste. De l'opposition entre essentialisme et nominalisme, la pensée pourrait alors basculer dans une autre opposition entre réalisme et idéalisme. À titre d'exemple, le rejet de l'idée d'une « essence » *a priori* du cheval ne signifie pas pour autant que l'espèce « cheval » n'a aucune réalité biologique et n'est qu'un mot déconnecté de toute réalité[124].

Ces deux couples philosophiques : essentialisme contre nominalisme, d'une part, et réalisme contre idéalisme, d'autre part, nous conduisent à mettre en avant l'idée que « la pensée fonctionne de telle façon que les obstacles vont presque toujours par paire. À chaque obstacle repéré, on peut associer un obstacle symétrique, qui pourrait en prendre la succession dans la pensée, ou entre lesquels celle-ci oscillerait », idée formulée par Brigitte Peterfalvi (2008, p. 113), à la suite de Gaston Bachelard[125].

Ce débat pose la question de la nature de la réalité à laquelle nous avons accès en élaborant des concepts taxonomiques. Michel Brossard, psychologue du développement à l'université de Bordeaux, formule ainsi le problème :

> « Dire que les concepts sont des constructions de l'esprit humain est une proposition acceptable. Mais de cette proposition il n'en découle pas nécessairement que nous sommes condamnés à n'avoir accès qu'à ce qui apparaît (les phénomènes au sens du phénoménisme) car l'histoire des concepts montre précisément que le travail de l'esprit humain permet à ce dernier de dépasser les apparences et d'avoir accès à des niveaux plus profonds (plus *essentiels*) de la réalité » (Brossard, communication personnelle, 9 décembre 2015).

Afin d'éclairer cette question de la nature philosophique relative à la question des groupes taxonomiques, nous allons maintenant examiner le positionnement de plusieurs des auteurs, étudiés précédemment, en mettant l'accent sur la systématique évolutionniste (dès les années 1930).

[124] « L'essence n'a pas d'autre existence réelle que celle des mots qui l'expriment » (Sève, 1980, p. 676).

[125] « C'est au point qu'on pourrait parler d'une loi psychologique de la **bipolarité des erreurs**. Dès qu'une difficulté se révèle importantes, on peut être sûr qu'en la tournant, on butera sur un **obstacle opposé.** (…) À notre avis, elle provient de l'attitude polémique de la pensée scientifique devant la cité savante. (…) **Peu à peu nous sommes amenés à réaliser nos objections en objet, à transformer nos critiques en loi**. » (Bachelard, 1938, p. 20)

3.4.2. Éclairage historique du débat sur la nature philosophique des taxons

- **Le débat entre classifications artificielle et naturelle au XVIII^e siècle**

Le débat sur la nature philosophique des taxons (réelle ou non) n'est pas récent. Au cours du premier chapitre (cf. p. 23), nous avons été amenés à retracer les contours d'un vif débat qui se déroula au cours du XVIII^e siècle, celui de l'opposition entre les classifications artificielle et naturelle des êtres vivants. Dans ce contexte, Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, s'opposera à Carl von Linné. Buffon considérait que les genres et autres classes sont des inventions humaines. Il était partisan d'une vision continuiste du vivant[126].

Si Buffon rejette les catégories taxonomiques comme étant des constructions artificielles, il admet cependant l'existence et la réalité d'une espèce sur des bases accessibles expérimentalement (tests de croisements), comme le critère d'interfécondité.

- **Le débat au XX^e siècle**

Nous circonscrirons notre analyse du débat philosophique concernant le caractère « réel » ou bien construit des taxons à la Nouvelle Systématique.

Concernant le niveau taxonomique de l'espèce, les tenants de la synthèse néodarwiniste considéraient l'espèce comme un groupe naturel. À la suite de Dobzhansky, Mayr formula la définition biologique de l'espèce basée sur l'interfécondité[127]. C'est ce concept biologique de l'espèce qui établit le lien entre cette unité taxonomique élémentaire et les mécanismes évolutifs au sein des populations et qui peut aboutir à la spéciation par isolement reproductif.

À cette époque pourtant, la relation entre phylogénie et taxonomie ne faisait pas consensus. Ainsi deux positions antagonistes s'expriment au sein de l'ouvrage collectif *The New Systematics* (1940). D'un côté, tout comme Julian Huxley et Ernst Mayr, le botaniste Thomas Prague considère que la taxonomie doit être basée sur les relations phylogénétiques supposées ou prouvées. De l'autre côté, John Gilmour, co-auteur de *The News Systematics* (1940) prône de mettre fin aux spéculations phylogénétiques en taxonomie. En effet, Gilmour écrivait que « d'une façon générale, l'objet de toute classification est de permettre aux classificateurs de procéder à des généralisations inductives à propos des données significatives qu'il est est en

[126] « Cet examen nous conduit à reconnoître évidemment qu'il n'y a aucune différence absolument essentielle et générale entre les animaux et les végétaux, mais que la nature descend par degrés et par nuances imperceptibles d'un animal qui nous paroît le plus parfait à celui qui l'est le moins, et de celui-ci au végétal » (Buffon, 1753, p. 8).

[127] « Species are groups of actually or potentially interbreeding natural populations which are reproductively isolated form other such groups » (Mayr, 1942, p. 120, cité par Sapp, 2009, p. 81)

train de classifier » (Gilmour, 1940, p. 465, cité par Hull, 1986, p. 171). Il préconise l'élaboration d'une classification avant de construire des hypothèses phylogénétiques.

D'autres systématiciens de cette époque critiquèrent la prise de position phylogénétique de la systématique évolutionniste, comme les Américains R. E. Blackwelder et A. Boyden en 1952, *The nature of systematics*

> « Le grand objet de la classification est partout le même. Il consiste à regrouper les sujets d'étude en fonction de **leur nature essentielle** » (Blagkwelder & Boyden, 1952, p. 31, cité par Hull, 1986), c'est nous qui soulignons.

La référence faite aux « natures essentielles » pourrait être interprétée comme la manifestation d'une pensée essentialiste.

Les systématiciens s'opposant au lien entre évolution et classification considéraient que la classification devait être élaborée en dehors de toute théorie, ce qui n'était pas sans poser problème. Ces critiques conduiront, au début des années 1960, au développement de la taxonomie numérique (ou phénétique). Sokal & Sneath (1963) en furent les principaux protagonistes. Mais, quant à eux, ils ne proposèrent pas « l'élimination de toute référence aux théories scientifiques en systématique ; ils voulaient seulement l'écarter de la phase initiale de la systématique » (Hull, 1986, p. 172).

Avec W. Hennig (1950 ; 1966), la cladistique avance une méthode scientifique pour construire une phylogénie permettant l'élaboration d'une classification phylogénétique.

Ce bref aperçu des débats ayant eu cours au XX^{e} siècle donne une idée de la diversité de positionnements sur les relations entre phylogénie et classification et sur la nature philosophique des groupes. Certaines, comme celle de W. Hennig, sont en rupture claire avec l'essentialisme alors que d'autres, comme celles de Blackwelder et A. Boyden en 1952, peuvent être interprétées à la lueur de ce mode de raisonnement.

- **Relation entre essentialisme et définition des groupes taxonomiques**

➢ L'histoire mythique de l'essentialisme en taxonomie (Winsor, 2003 ; 2006)

En 1965, David L. Hull (1935-2010) publiait un article intitulé *The effect of essentialism on taxonomy - two thousand years of stasis*. Il y présentait l'impact négatif durable de l'essentialisme sur la taxonomie. Les taxonomistes auraient mobilisé une pensée platonicienne et aristotélicienne pendant des siècles et jusqu'à Darwin, pensée qui aurait permis l'émancipation de l'essentialisme par la mise en avant d'une pensée populationnelle. L'historienne de la biologie, Mary P. Winsor, conduit une analyse historique remettant

totalement en cause ce qu'elle dénonce comme un mythe, élaboré par les deux biologistes : Ernst Mayr et Arthur Cain, ainsi que le philosophe David Hull dans les années 1950-1960 (Winsor, 2003, 2006a)[128].

Nous désirons porter notre attention sur les critiques portées par Mary P. Winsor afin de mieux comprendre la place que l'essentialisme aurait historiquement joué dans la taxonomie.

Tout d'abord, qu'est-ce que l'essentialisme au sens aristotélicien ? Il correspond à une définition qui se base sur des propriétés toujours présentes, nécessaires et suffisantes. David Hull le décrit ainsi :

> « Disregarding all the talk about essences, what Aristotle was advocating in modern terms is definition by properties connected conjunctively which are severally necessary and jointly sufficient » (Hull, 1965, p. 318)

M. P. Winsor propose une importante distinction entre un essentialisme ontologique et un essentialisme épistémologique ou méthodologique. Elle met en avant l'idée qu'il n'y a pas nécessairement superposition entre les deux. En effet, un taxonomiste persuadé de l'existence d'essences idéelles ne suit pas forcément une méthode aristotélicienne pour définir les groupes biologiques. Ne pas faire cette distinction peut conduire à une distorsion du passé à la lumière de nos projections actuelles[129].

Une autre façon de définir un groupe biologique existe et se place en alternative à la définition essentialiste aristotélicienne, à savoir mobiliser un ensemble de propriétés (ou 'cluster') qui ne sont pas nécessairement toutes présentes chez l'ensemble des membres du groupe. Cela conduit à établir un groupe polythétique, défini par plusieurs caractères qui ne sont ni nécessaires, ni suffisants[130]. Ce type de définition ('*cluster concept'*) est à rattacher à la notion de ressemblances familiales ('*family resemblances'*) de Ludwig Wittgenstein (1965, p. 325).

Winsor poursuit en expliquant que mobiliser ce type de définition basée sur un cluster de propriétés non nécessaires et suffisantes reste incompatible avec un essentialisme

[128] « The story that the essentialism of philosophers dominated the development of systematics may prove to be a myth » (Winsor, 2003, p. 387).

[129] « Much of the literature relating essentialism to systematics is seriously flawed by the failure to separate **ontology and epistemology**. (…) Above all, we must treat it as an empirical question whether various naturalists in the past were **essentialists ontologically (in their world view),** and as a separate question, requiring separate evidence, whether they were **essentialists epistemologically (in their method**). Although we may think that people's beliefs about the nature of reality should be tightly correlated with their research procedure, we ought not to prejudge the connection. If we assume, for example, that a person who believed in the existence of essences must have used the essentialist method, **we run the risk of distorting the past through the lens of our expectation**, thereby missing the opportunity to learn anything from history. » (Winsor, 2003, p. 389)*, c'est nous qui soulignons.*

[130] Notons que le fait d'envisager qu'une propriété ne soit pas nécessairement présente chez tous les membres d'un taxon est compatible avec une approche évolutionniste puisqu'elle permet d'envisager des évolutions secondaires de certains caractères au sein d'une lignée.

aristotélicien. Pour Cain, Mayr et Hull, ce type de définition serait une innovation récente de la taxonomie[131].

Ce serait une affirmation fausse pour Winsor. En effet, les systématiciens pré-darwinistes établissaient différents regroupements dont les familles par enchaînement, dans lesquelles chaque genre ou chaque espèce étaient liés l'une à l'autre par des ressemblances claires. Mais à la fin de la chaîne de ressemblance, une caractéristique de l'un des premiers représentants pouvait être absente chez l'un des derniers. Cette méthode conduit donc à l'élaboration de groupes polythétiques. Ces systématiciens n'étaient pas essentialistes au sens de la logique platonicienne et aristotélicienne d'après Mary P. Winsor.

Elle avance également que la méthode typologique qu'elle préfère nommer « méthodes des exemplaires », en raison de l'image négative que l'on se fait des types depuis E. Mayr, peut également mener à l'élaboration de groupes polythétiques.

Elle explique comment Linné établissait ses regroupements. Celui-ci débutait par la description d'une espèce exemplaire (ce que l'on appelle classiquement le « type »). Pour cela, il listait une série de caractères descriptifs puis, gardant en tête l'espèce décrite, il rattachait d'autres espèces si les ressemblances semblaient assez fortes. Parmi les caractères listés initialement, il ne gardait que les caractères « essentiels » pour définir le genre. Mais Winsor (2006b)[132] explique que le terme « essentiel » signifie pour Linné : utile pour classer ('taxonomically useful'). Elle fournit plusieurs justifications historiques - que l'on ne reprendra pas ici - indiquant que Linné acceptait qu'un taxon soit polythétique.

L'argumentaire que développe Mary P. Winsor conduit à plus de prudence en n'amalgamant pas l'essentialisme aristotélicien à la pensée typologique. Si la pensée typologique s'oppose à la pensée populationnelle, comme l'a dénoncé E. Mayr, et constitue en cela un obstacle à l'évolution, la pensée typologique n'est pas synonyme d'un essentialisme aristotélicien. En faisant cet amalgame en 1968, Winsor estime que cela engendra une confusion importante.

> « Actually, however, what Mayr had written in 1959 was that the opposite of population thinking was 'typological thinking'. The words 'essentialist', 'essentialism', and even 'essence' did not appear in his writings until a decade after the 1959 'first full articulation'. **Mayr's 1968 decision to accept 'essentialism' as a synonym of 'typology' contributed to the confusion of issues that**

[131] « there is no doubt that allowing a group to be polythetic is a **complete, radical, and significant abandonment of both the spirit and the letter of what the followers of Plato and Aristotle understood to be the proper, essentialist method of definition**. The story sketched by Cain, Mayr, and Hull took for granted, indeed its force depended upon, the assumption that using clusters of properties in definitions, that is, allowing polythetic groups, was a **recent innovation within taxonomy** » (Winsor, 2003, p. 390-391).

[132] Dans un article au titre pugnace *Linnaeus's biology was not essentialist*, M. P. Winsor prolonge la critique de la vision classique concernant l'impact de l'essentialisme sur les systématiciens prédarwinistes.

> **has blighted the history of systematics ever since** (Mayr 1968) » (Winsor, 2006a, p. 152), *c'est nous qui soulignons.*

Nous retenons de cette analyse l'importance d'une prudence afin de bien distinguer pensée typologique et essentialisme aristotélicien. Une façon d'étudier le recours éventuel à une pensée essentialiste réside dans l'analyse du type de définitions des groupes. Nous entendons examiner deux systématiciens du XX^{e} siècle qui proposèrent un système à quatre puis cinq règnes : Copeland et Whittaker. Le choix de ces deux auteurs se trouve justifié par leur attachement explicite à l'importance d'une définition en taxonomie.

- **La nature des définitions chez Copeland et Whittaker**

Copeland et Whittaker formulent tous les deux la nécessité de pouvoir définir clairement un groupe. Mais à quel type de définition cela se réfère-t-il : une définition aristotélicienne impliquant des caractéristiques nécessairement présentes ou une définition de type 'cluster' de propriétés non nécessaires et suffisantes ?

Copeland, dont le système a été analysé page 183, nous explique que l'établissement d'un groupe repose sur des hypothèses évolutives visant à déterminer des groups naturels (au sens où ils partagent une histoire évolutive commune), mais aussi sur des raisons pratiques comme la possibilité de définir un groupe par description[133].

Les végétaux sont définis sur la base du partage des caractéristiques cellulaires et biochimiques suivantes : présence de quatre pigments dans les plastes verts (chlorophylles A et B, carotène et xanthophylle) ainsi que de la cellulose et de l'amidon véritables. Mais certains organismes qu'il classe au sein des Protista possèdent certains de ces caractères. Copeland écrit donc que les végétaux sont définis par la combinaison entière des caractères. Cette définition conjonctive, basée sur la présence nécessaire de différents caractères, semble nous renvoyer à une définition de nature aristotélicienne, plus qu'à une définition de type « cluster ». Il n'évoque pas la disparition secondaire de caractéristiques au sein des végétaux, comme la perte de chlorophylle chez certaines plantes à fleurs parasites. Un argument de cette nature permettrait d'invalider l'idée qu'il utilise une méthode essentialiste aristotélicienne.

Cependant, dans le cas des Protista, il les définit dans un premier temps sur la base de caractéristiques nucléaires considérées primitives, puis il envisage bel et bien la possibilité

[133] « A third element of convenience lies in **feasibility of definition by description** (…). The formulation of a system of classification, then, involves a double set of hypotheses: **hypotheses as to the ancestry, origin, and evolution of groups**, and hypotheses as to **what boundaries will be found expedient** » (Copeland, 1938, p. 383-384), *c'est nous qui soulignons.*

« If the whole assemblage [Protista] is a natural group, the question of recognizing it as a taxonomic group, a kingdom, is **one of convenience**. One element of convenience, as already mentioned, lies in the feasibility of **definition by description.** » (Copeland, 1938, p. 409), *c'est nous qui soulignons.*

d'une perte secondaire dans certaines lignées. Ce type de définition réfère donc au type cluster, en accord avec sa conception évolutionniste de la classification[134].

Mais par ailleurs, au sein des organismes nucléés, notre auteur envisage également les Protista sur la base de l'absence des caractères possédés par les végétaux et animaux. Cette définition correspond à une conception gradiste établissant un groupe sur la base d'un niveau d'organisation et l'absence de caractères à l'état dérivé.

> « The kingdoms of plants and animals, being derived groups, are distinguished respectively by **combinations of positive characters pecular to themselves**. **The Protista may be distinguished by the absence of these characters** » (Copeland, 1938, p. 409), *c'est nous qui soulignons.*

Le tableau 23 dresse le bilan des trois façons de définir un groupe par H. F. Copeland.

Définition	**Nature de la définition**
Plantae : A (noyau) + B (chloroplaste) + C (chlorophylle A) + D (chlorophylle B) + E (amidon) + F (cellulose) *Avec combinaison nécessaire*	Définition aristotélicienne (conjonctive)
Protista : A (noyau) + G (permanence de la membrane nucléaire durant la division cellulaire) + H (présence d'un centrosome) + … *Avec perte secondaire possible d'un ou de plusieurs caractères*	Définition de type cluster de propriétés non nécessaires
Protista : A (noyau) mais pas [B+C+D+E+F] *Absence de la combinaison entière définissant les végétaux*	Définition gradiste basée sur un degré d'organisation (ici présence du noyau) et sur l'absence de certaines caractéristiques

Tableau 23 : trois types de définition mobilisées par Copeland (1938)

Cette diversité de définition d'un groupe semble pouvoir être interprétée comme le manque d'une méthode scientifique d'élaboration des groupes taxonomiques. Elle le conduit à un groupe particulièrement hétérogène (Protista) qui rend périlleuse sa définition. Mais il nous semble clair que ce serait une erreur de qualifier la pensée de Copeland d'essentialiste en raison de sa définition des végétaux, fondée sur une combinaison de caractères présentée comme nécessaire. Le fait de citer des pertes secondaires pour certains groupes nous paraît suffisant pour attester qu'il n'est pas essentialiste.

[134] « All these characters fade out in the evolution of various lines: we find the nuclear membrane disappearing at earlier and earlier stages in brown algae and in Fungi » (Copeland, 1938., p. 409).

Qu'en est-il du système à cinq règnes de Whittaker, dont la classification a été étudiée en détail p. 190 ?

Comme Copeland, Whittaker insiste sur l'importance de définitions claires et pratiques basées sur des critères clés (1959, p. 222). Il annonce explicitement que les classifications sont des constructions humaines, invalidant d'emblée toute hypothèse d'essentialisme ontologique[135].

Analysons tout de même la façon dont il définit les groupes pour les comparer avec ceux de Copeland et, ainsi, mieux comprendre sa logique de définition.

Chaque groupe est décrit de façon synthétique par Whittaker. Nous avions précédemment présenté sa définition du groupe des végétaux. À nouveau, nous la citons de façon à l'analyser sur le plan définitoire.

> « Multicellular organisms with walled and **frequently** vacuolate eucaryotic cells and with photosynthetic pigments in plastids (together with closely related organisms which lack the pigments or are unicellular or syncytial). **Principal** nutritive mode photosynthesis, but a number of lines have **become absorptive**. **Primarily** nonmotile, living anchored to a substrate. Structural differentiation leading toward organs of photosynthesis, anchorage, and support, and **in higher forms** toward specialized photosynthetic, vascular, and covering tissues. Reproduction **primarily** sexual with cycles of alternating haploid and diploid generations, the former being progressively reduced toward the higher members of the kingdom. » (Whittaker, 1969, p. 154)

Le recours aux termes « frequently », « principal » ou « primarily » signifie que tous les membres du groupe ne possèdent pas certains caractères : la vacuole, la photosynthèse, les tissus vasculaires, le cycle digénétique ou la vie fixée.

D'autres caractères semblent cependant nécessaires pour définir les végétaux, puisque aucun modalisateur n'indique qu'ils puissent être absents : la multicellularité, le noyau, la paroi cellulaire, les plastes. Comment interpréter les caractères dont la présence n'est pas remise en cause ? Il ne nous semble pas évident qu'il s'agisse d'une nécessité au sens logique de la définition aristotélicienne. Il pourrait s'agir seulement de caractères pour lesquels Whittaker n'a pas constaté empiriquement d'évolution au sein du groupe. Par exemple, il ne connaît pas d'organismes classés dans son règne Plantae qui soient dépourvus de paroi.

Par ailleurs, les caractères non nécessaires peuvent être absents pour des raisons différentes. Certains peuvent être perdus au sein du groupe, l'état présenté comme ancestral étant la présence (‘*primarily’*). C'est le cas de la nutrition photosynthétique, de la vie fixée et du cycle de reproduction digénétique. D'autres caractères peuvent aussi être absents parce que

[135] « The kingdoms are **man's classification**, the largest groupings he chooses to recognize by chosen criteria, within the living world. It is suggested that the **kingdoms are, most essentially, major directions of evolution** » (Whittaker, 1957, p. 536-537), *c'est nous qui soulignons.*

l'apparition serait un état dérivé. Il s'agit de l'apparition des tissus vasculaires et de protection apparaissant chez les formes 'supérieures'.

Cette citation ne l'indique pas, mais à la fin de son article de 1969, Whittaker indique qu'il a conscience que certaines ressemblances ne sont pas homologues (il parle de convergences).

Ainsi, la définition proposée par Whittaker est formée de mélange divers de caractères homologues et homoplasiques dont certains sont présentés comme nécessaires alors que d'autres non.

Le recours au mode de vie et à des ressemblances fonctionnelles restent liés à son ambition d'établir une classification basée sur les modes de nutrition et les niveaux d'organisation.

Il s'agit donc d'un groupe fondé sur un cluster de ressemblances (homologues ou non).

En conclusion, nous retiendrons que l'opposition entre essentialisme et nominalisme reste complexe et n'est pas sans lien avec un autre couple philosophique : idéalisme et réalisme. L'histoire des classifications révèle des positions fortement divergentes concernant la nature réelle ou artificielle des taxons, notamment l'espèce constituant le taxon élémentaire. L'analyse de Mary P. Winsor nous conduit à distinguer un essentialisme ontologique d'un essentialisme épistémologique (ou méthodologique) non superposables. Son analyse historique montre que méthodologiquement les systématiciens, ayant recours à un type pour définir leurs groupes (type qu'elle préfère nommer exemplaire), ne mobilisent pas pour autant l'essentialisme aristotélicien qui utilise une définition basée sur des caractères nécessaires et toujours présents. Par ailleurs, notre étude des définitions des règnes, avancées par Copeland et Whittaker, laisse entrevoir une diversité d'approche et de caractères utilisés. Dans le cas de Whittaker, l'association de ressemblances homologues et homoplasiques (comme le mode de vie) était particulièrement saillante et en accord avec son projet de classification éclectique. La définition d'un groupe taxonomique reste étroitement liée au cadre théorique et méthodologique qui fonde la classification. Un clade est un groupe phylogénétiquement défini par un ensemble de synapomorphies (états dérivés de caractères). Ce sont des propriétés suffisantes, mais non nécessaires, puisqu'elles peuvent évoluer, voire disparaître, au sein de certains membres de la lignée.

3.4.3. Conception prototypique cellulaire

L'enquête didactique nous a révélé une tendance dominante à mettre en avant un type cellulaire idéalisé : « la » cellule végétale. Ce raisonnement est lié à une pensée typologique à l'échelle cellulaire de nature à constituer un obstacle pour penser la diversité des végétaux à l'échelle cellulaire. Au cours du chapitre précédent, nous avions discuté de l'origine didactique présumée de cette conception et des difficultés qu'elle semble porter, notamment le risque de généralisation de caractères d'un modèle d'étude à l'ensemble des végétaux (au sens fonctionnel).

Outre son origine didactique, à présent nous allons examiner, sur un plan historique, si certaines classifications mobilisèrent ce type de raisonnement prototypique à l'échelle cellulaire.

Les systèmes classificatoires qui donnèrent lieu à des définitions des végétaux basées sur des caractéristiques cellulaires précises sont ceux développés au cours du XX^{e} siècle. Le règne Plantae de Copeland (1938) reste basé sur des caractéristiques cellulaires et biochimiques (chloroplaste vert avec des pigments spécifiques, cellulose, amidon). Mais l'auteur ne met pas en avant un modèle particulier sur lequel il se fonde. De plus, il contrôle la délimitation des végétaux à certaines caractéristiques bien particulières. Dans sa classification, les organismes dotés de plastes bruns possédant de la chlorophylle C au lieu de la chlorophylle B ne sont pas considérés comme végétaux : ce sont des protistes.

Whittaker (1969) définit les végétaux sur une caractéristique fonctionnelle (nutrition photosynthétique et écologique) mais également sur la base de la multicellularité. Aussi les organismes eucaryotes unicellulaires pourvus de plastes et d'une paroi n'en sont pas pour autant végétaux. Il élabore sa classification sur des grands principes (directions évolutives et niveaux d'organisation) et il ne procède pas d'une généralisation à partir d'espèces modèles particulières.

Enfin, en 1981, T. Cavalier-Smith sera à l'origine de la scission de l'unique règne végétal en deux règnes Plantae et Chromista, se distinguant sur des critères cellulaires, comme la structure du plaste et la nature des pigments. Il utilise de nombreuses observations sur des espèces variées pour établir des regroupements.

Sur un plan historique, aucune classification ne forme un règne végétal comprenant l'ensemble des organismes (unicellulaires compris) possédant des cellules eucaryotes possédant des plastes. Nous pouvons affirmer que la conception dominante remarquée à l'occasion de l'enquête didactique, ne tire pas ses racines d'un règne végétal et (ou) d'un

système taxonomique particulier. Il nous semble donc impropre de qualifier cet obstacle d'épistémologique au vue de notre étude des classifications.

3.4.4. Conclusion relative aux obstacles épistémologiques et leur influence

Il ressort que sur les cinq modes de raisonnement caractérisés comme pouvant être des obstacles potentiels lors de notre enquête didactique, quatre d'entre eux s'avèrent s'actualiser sous des formes différentes dans l'histoire des classifications, de Linné à nos jours. L'étude de ces quatre obstacles nous offre l'occasion de tirer les conclusions suivantes :

- La pensée catégorielle établissant une dualité du vivant opposant les végétaux aux animaux était dominante jusqu'au XVIII^{e} siècle et structurait le système linnéen. Au XIX^{e} siècle, l'introduction d'un troisième règne du vivant mit fin à cette division binaire séparant les animaux et les végétaux comme seuls groupes biologiques. Mais la pensée catégorielle n'a pas disparu pour autant. Dans l'ultime classification de E. Haeckel (1904), l'opposition binaire opposait alors Protista et Histonia, sur la base de l'organisation tissulaire, et la division animale-végétale se manifestait à un rang inférieur au sein de chaque règne. Une autre division binaire majeure opposant Eucaryotes et Procaryotes a dominé les classifications au cours du XX^{e} siècle jusqu'au système tripartite de Woese (1987, 1990) qui comprenait trois domaines du vivant : Archaea, Bacteria et Eucarya. Bien qu'hypothétique, il n'est pas exclu que les vives oppositions à l'encontre de Woese aient combiné l'attachement à des grades avec la pensée catégorielle, valorisant inconsciemment une opposition par couple.
- Le macrocentrisme est une forme de raisonnement qui explique - probablement en partie - la forte minoration accordée aux micro-organismes dans le développement de la systématique au XX^{e} siècle, comme l'indique l'absence de microbiologiste dans l'ouvrage collectif fondateur de la systématique évolutionniste, *The New Systematics* (1940), ou encore la quasi-absence des micro-organismes dans l'ouvrage de presque mille pages, publié par E. Mayr, *Growth of Biological Thought* (1982). Notre cécité à l'égard des micro-organismes est interprétée par S. J. Gould comme un effet d'échelle puisque nous sommes surentraînés à observer des objets et des phénomènes à notre échelle de temps et d'espace. Le macrocentrisme pourrait constituer, pour la biodiversité, l'expression de l'obstacle transversal nommé « primat de la perception sur la conceptualisation » par Jean-Pierre Astolfi & Brigitte Peterfalvi (1993, p. 109).
- La pensée gradiste reste un obstacle majeur des systèmes classificatoires étudiés. Dans un contexte évolutionniste, le gradisme maintient la conception scaliste de la nature. Il mobilise l'idée de progrès qui constitue une valeur étrangère à la pensée scientifique. Particulièrement tenace en se combinant aux conceptions évolutionnistes, le gradisme constitue un mode de

pensée très fréquent en taxonomie jusqu'au développement des classifications phylogénétiques, au sens hennigien.

- L'essentialisme comporte deux aspects différents qu'il est important de distinguer : un essentialisme ontologique et un essentialisme épistémologique (ou méthodologique). Le premier consiste à penser que les taxons sont intrinsèquement porteurs d'une essence idéelle. Le second reste une façon de définir un groupe par la logique aristotélicienne qui recourt à une définition basée sur des caractères nécessaires et toujours présents. L'étude historique de Winsor (2003) remet en cause l'idée dominante affirmant que les systématiciens pré-darwinistes seraient essentialistes. Elle avance que ces derniers construisaient des groupes polythétiques fondés sur un ensemble de propriétés non nécessaires. Mary P. Winsor suggère donc de ne pas confondre la pensée typologique, obstacle à la pensée évolutionniste (Mayr), avec l'essentialisme épistémologique. L'étude des définitions des règnes de Copeland montre une diversité d'approches définitoires conjuguées. Une analyse trop rapide pourrait donner l'impression d'une définition aristotélicienne pour le groupe des végétaux. En effet, la combinaison entière de caractères semble nécessaire. La définition des règnes de Whittaker mélange de façon éclectique différentes ressemblances structurales et fonctionnelles, homologues ou non. Les groupes phylogénétiques (ou clades) proposés par Keeling *et al.* (2005), Adl (2005) et Burki (2014) étaient définis par le partage d'états dérivés de caractères homologues (synapomorphies). Cette différence montre que l'activité de définition se trouve étroitement liée au cadre théorique et méthodologique dans lequel est élaborée une classification.

- Ces différents modes de pensée ne fonctionnent pas forcément de manière indépendante mais peuvent jouer de façon combinée dans l'élaboration d'une classification.

- Loin de considérer que les étudiants rencontrent les mêmes obstacles, cette étude fournit une référence historique qui nous permet de formuler des hypothèses sur les modes de raisonnement et les difficultés rencontrées à l'occasion de la reconstruction didactique.

4. Conclusion de l'étude historique

Les différentes conclusions partielles sont synthétisées dans le tableau 24 qui dresse le bilan de nos principaux résultats pour chacune des questions de recherches de cette étude historique.

Questions de recherche (QR) et résultats principaux (RP)
QR1. Quels sont les changements taxonomiques successifs ayant conduit à la rectification du groupe des végétaux du XIX^{e} siècle à nos jours et plus particulièrement quelle est la nature des problèmes auxquels les systématiciens se sont affrontés à l'occasion de la construction des systèmes classificatoires successifs ?
RP1. Le nombre de grandes divisions taxonomiques du vivant varie de façon conséquente : de deux et à dix règnes (Cavalier-Smith, 1981). La nature du groupe des végétaux est corrélée au nombre de divisions du vivant (règnes puis super-groupes). Le groupe des végétaux a un contour changeant selon les systèmes classificatoires et il devient multiple en 1981 (quatre règnes végétaux regroupés en deux : Plantae et Chromista). Puis, dans les classifications les plus récentes (2005, 2014), il n'est plus question des végétaux. En effet, la majorité des super-groupes eucaryotiques comprennent des lignées possédant des plastes, acquis de façon indépendante. Le tableau synoptique (cf. p. 235) dresse un bilan des principaux systèmes et changements concernant les végétaux. Cette évolution du concept taxonomique de végétal est liée notamment à la nature des problèmes étudiés, aux positions théoriques et méthodologiques sur la façon de classer et aux techniques disponibles donnant accès à de nouvelles données. Différents problèmes jouèrent comme l'importance des relations évolutives, démarquant les classifications évolutives ou phylogénétiques des classifications fixistes ; le problème de la place des unicellulaires puis, plus particulièrement, la place des bactéries dans la classification ; l'importance accordée aux modes de nutrition en tant que direction évolutive ; le problème de la recherche de groupes monophylétiques au sens large (incluant les groupes paraphylétiques) ou au sens hennigien (clades). Le problème de la recherche de grades traduisant des degrés d'organisation s'est également posé de façon récurrente. Un problème de nomenclature s'est immiscé à plusieurs reprises. En effet, plusieurs systématiciens mettront en avant l'importance de la définition des groupes pour élaborer une classification qui ne devait pas se baser uniquement sur des relations évolutives (e.g. Copeland, Whittaker). Cavalier-Smith continue de parler de « plant kingdoms » (1981) ou « botanical kingdoms » (1998) malgré l'éclatement du règne végétal, en raison de l'utilisation du Code International de Nomenclature Botanique.

QR1a. Comment furent classées les espèces unicellulaires dans les différents systèmes classificatoires et quelles sont les raisons des changements taxonomiques les concernant ? Sur un plan historique, ces espèces peuvent-elles constituer un « fil rouge » pertinent pour suivre les modifications taxonomiques majeures ?
RP1a. Tout d'abord placés et regroupés dans les Infusoires au sein du règne animal, le problème de la place des organismes unicellulaires aux caractéristiques mi-animales et mi-végétales a conduit à la fin du système à deux règnes. Des propositions d'un troisième règne ont émergé, regroupant les organismes unicellulaires : Protozoa (Owen, 1860) et, dans un cadre évolutionniste, Protista (Haeckel, 1866). Copeland (1938) introduisit un quatrième règne (Monera) en établissant la présence d'un noyau comme premier critère. Cependant, le règne Monera n'a été reconnu que par peu de microbiologistes dans les années 1940, le concept de bactérie manquait encore d'une définition partagée. Dans son système de 1969 (et non dans celui de 1959), Whittaker reprit cette distinction entre Monera et Protista. Par la suite les Procaryotes ont été divisés en deux domaines par Woese (1987), ce qui a donné lieu à d'importantes controverses. Le contour des Protista a beaucoup changé avec la délimitation des végétaux et des animaux, faisant des espèces unicellulaires un repère intéressant (« fil rouge ») pour tracer les changements historiques des grandes divisions du vivant, et du groupe des végétaux en particulier. Ainsi pour Copeland, seules les algues vertes unicellulaires (Volvocales) sont végétales parmi les organismes unicellulaires nucléés, les autres étant des protistes. Pour Whittaker et Margulis, tous les Eucaryotes unicellulaires sont des protistes. Pour Cavalier-Smith, seuls les unicellulaires appartenant aux règnes Plantae et Chromista sont des végétaux (au sens nomenclatural). Ainsi, pour lui, les Euglénophytes ne sont pas des végétaux. Pour Adl, Keeling ou Burki, dans les années 2000-2010, la question ne se pose plus en ces termes puisque les végétaux n'existent plus.
QR1b. Quel problème a conduit Whittaker à séparer les végétaux des champignons et à proposer un système à cinq règnes ?
RP1b. Whittaker (1957, 1959, 1968) élabore une classification reposant sur des niveaux d'organisation hiérarchisés et sur des caractéristiques fonctionnelles (trois modes de nutrition) liées à des rôles écologiques (producteurs, consommateurs, décomposeurs) dont il considère qu'elles reflètent des grandes directions évolutives. C'est par cette ambition écologique qu'il se distingue profondément des systèmes précédents, rendant éclectique sa classification. Retenant des groupes polyphylétiques en toute connaissance de cause, le problème premier qui fonde son système n'est donc pas phylogénétique. Whittaker poursuit un double objectif évolutif et écologique.

QR1c. Comment la systématique a modifié ses principes et méthodes conduisant à abandonner le système à cinq règnes puis l'utilisation de grades ? Quelles sont les conséquences de ces changements méthodologiques sur la nature du groupe des végétaux dans l'arbre du vivant ? Le groupe Plantae existe toujours mais avec un contour différent, cette question devrait nous permettre de comprendre les raisons de ce changement.

RP1c. Le système à cinq règnes de Whittaker (1969), modifié ensuite par Margulis (1971, 1978) est remis en cause par Cavalier-Smith (1981) en raison de son polyphylétisme, contraire aux « principes de la taxonomie » (1981, p. 462). Cet auteur reste mobilisé par l'établissement de groupes monophylétiques (s.l.). Mais il s'oppose à Hennig et accepte les groupes paraphylétiques, dans la mouvance de la systématique évolutionniste, en profond désaccord théorique avec la systématique phylogénétique (cladistique). Les classifications de Adl *et al.* (2005), Keeling *et al.* (2005) et Burki (2014), quant à elles, cherchent exclusivement la formations de clades, ce qui explique la disparition des végétaux des phylogénies récentes.

Le terme Plantae désigne donc un concept hautement polysémique, en raison des différences d'usage tant historique qu'actuel (désignant Archaeplastida ou Embryophyta selon les auteurs).

QR2. Quels sont les obstacles épistémologiques ayant pesé dans les classifications, au XIX^e^ et XX^e^ siècles, et la délimitation du groupe des végétaux ?

RP2. Quatre obstacles épistémologiques nous semblent avoir pesé dans l'histoire des classifications depuis le XIX^e^ siècle. Ils ont pu jouer de façon combinée. Nous laissons de côté la pensée créationniste ayant étudié essentiellement des classifications élaborées dans un cadre de pensée évolutionniste.

- La pensée catégorielle établissant une dualité du vivant opposant les végétaux aux animaux était dominante jusqu'au XVIII^e^ siècle et structurait le système linnéen. Dans l'ultime classification de Haeckel (1904), l'opposition binaire opposait Protista et Histonia sur la base de l'organisation tissulaire, et la division animale - végétale se manifestait encore mais à un rang inférieur au sein de chaque règne.
- Le macrocentrisme est une forme de raisonnement qui explique, probablement en partie, la forte minoration accordée aux micro-organismes dans le développement de la systématique au XX^e^ siècle. Il pourrait être lié à un effet d'échelle, étant surentraîné à observer des objets et des phénomènes à notre échelle humaine. Cet obstacle se rattache au « primat de la perception sur la conceptualisation » (Ibid.).
- La pensée gradiste est un obstacle majeur des systèmes classificatoires étudiés. Le gradisme maintient dans un contexte évolutionniste la conception scaliste de la nature et mobilise une valeur, l'idée de progrès. Particulièrement tenace, en se combinant aux conceptions évolutionnistes le gradisme constitue un mode de pensée très fréquent en taxonomie jusqu'au développement des classifications phylogénétiques, au sens hennigien.
- L'essentialisme ontologique consiste à penser que les taxons sont intrinsèquement porteurs d'une

essence idéelle. L'essentialisme épistémologique (ou méthodologique) est une façon de définir un groupe par la logique aristotélicienne qui recourt à une définition basée sur des caractères nécessaires, toujours présents. L'étude historique de Mary P. Winsor (2003) remet en cause l'idée dominante affirmant que les systématiciens pré-darwinistes seraient essentialistes. Elle suggère de ne pas confondre la pensée typologique, obstacle à la pensée évolutionniste, avec l'essentialisme épistémologique. L'étude des définitions des règnes montre une diversité d'approches définitoires pouvant se conjuguer. Une analyse trop rapide pourrait donner l'impression erronée d'une définition aristotélicienne.

Tableau 24 : synthèse des principaux résultats de recherche de l'étude historique

Chapitre 4 : reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences et des articles scientifiques

1. CADRE THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE DE L'EXPÉRIMENTATION DIDACTIQUE 268

1.1. Cadre méthodologique de notre reconstruction didactique : ingénierie didactique ou situation forcée ? 268

1.2. Utilisation de la littérature scientifique primaire dans la reconstruction didactique 272
1.2.1. Pourquoi travailler sur des articles scientifiques primaires non adaptés ? 272
1.2.2. Articles scientifiques et nature de la science 272

1.3. Réalisation de cartes conceptuelles 274
1.3.1. Qu'est-ce qu'une carte conceptuelle ? 274
1.3.2. Qu'est-ce qu'un concept ? 276
1.3.3. Importance des cartes conceptuelles dans la recherche en didactique des sciences 278

2. QUESTIONS DE RECHERCHE 281

2.1. Recherche de significations : étude des raisonnements et de l'image de la nature de la science des étudiants 282

2.2. Recherche de faisabilités : évaluation de certains choix didactiques et détermination de possibles didactiques 283

2.3. Recherche méthodologique : la réalisation de carte conceptuelle comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation 283
2.3.1. Les cartes conceptuelles comme outil de recherche sur le raisonnement 283
2.3.2. Les cartes conceptuelles comme outil de recherche sur la problématisation 284

3. PRÉSENTATION DE LA RECONSTRUCTION DIDACTIQUE ET JUSTIFICATION DES CHOIX 285

3.1. Choix des articles 285
3.1.1. Article d'écologie et classification fonctionnelle 285
3.1.2. Articles portant sur la systématique des Eucaryotes et classification phylogénétique 287
3.1.3. Bilan sur le choix des différents articles 290

3.2. La reconstruction didactique 292
3.2.1. Place dans la formation des étudiants 292
3.2.2. Programmation des différentes séances et présentation des différentes tâches 293
3.2.3. Accompagnement du travail d'analyse 300

4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE 304

4.1. Méthodologie relative aux questions de recherche de significations (QR1) 304
4.1.1. Description synoptique de la méthodologie 304
4.1.2. Analyse argumentative 305
4.1.3. Analyse des cartes conceptuelles en tant que productions finales 307
4.1.4. Méthodologie correspondant à chaque question du premier pôle 1 315

4.2. Méthodologie relative aux questions de recherche de faisabilités (QR2) 316

4.3. Méthodologie relative aux questions de recherche sur l'utilisation des cartes conceptuelles (QR3) 317
4.3.1. Classification hiérarchique des cartes : méthode d'aide au choix des cartes à étudier 317
4.3.2. Acquisition d'un enregistrement audio-visuel de la construction de la carte 318
4.3.3. Transcription 319
4.3.4. Étapes de l'analyse de la carte conceptuelle 319
4.3.5. Méthodologie correspondant à chaque question du troisième pôle 321

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION 323

5.1. Analyse des réponses au questionnaire préliminaire 323

5.2. Étude des raisonnements et de l'image de nature de la science des étudiants (QR1) 324
5.2.1. Analyse du débat en épisodes thématiques 324
5.2.2. Principes spécifiques des deux types de classifications biologiques 325
5.2.3. Écarts entre la problématisation développée par Cavalier-Smith et par les étudiants 335
5.2.4. Relation entre les différentes conceptions des végétaux et la pluralité des classifications : apport des cartes conceptuelles 337
5.2.5. Rectification historique du groupe des végétaux dans la systématique des Eucaryotes 345
5.2.6. Image de la nature de la science mobilisée par les étudiants 365

5.3. Évaluation des choix didactiques et détermination de possibles didactiques (QR2) 374
5.3.1. Engagement dans le débat collectif concernant les deux articles non lus 374
5.3.2. Pertinence du choix des articles 378
5.3.3. Faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais 384

5.4. La réalisation de cartes conceptuelles comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation (QR3) 385
5.4.1. De l'analyse de la carte conceptuelle à l'identification d'éléments à interroger au niveau de son élaboration 386
5.4.2. Argumentation de certains choix de construction du réseau conceptuel 390
5.4.3. Éléments faisant l'objet de discussions mais n'apparaissant pas dans la production finale 403
5.4.4. Les contraintes liées à la nature de la tâche 408
5.4.5. Bilan sur les apports de l'étude de la construction d'une carte conceptuelle 412
5.4.6. Étude de la problématisation développée au cours de la construction de la carte conceptuelle 416

6. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR NOTRE RECONSTRUCTION DIDACTIQUE 424

6.1. Conclusion sur l'étude du raisonnement et l'image de la nature de la science des étudiants 424
6.1.1. Les principes associés aux différentes classifications 424

6.1.2. La mise en jeu d'obstacles épistémologiques et didactiques 425
6.1.3. L'image de la nature de la science (NoS) 427

6.2. Conclusion sur les choix didactiques de la séquence 432
6.2.1. Des choix qui se sont révélés féconds 432
6.2.2. Modifications proposées 434

6.3. Conclusion sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche 438

À l'issue des deux enquêtes didactique et historique, nous sommes en mesure de formuler notre hypothèse de travail motivant la reconstruction didactique.

Nous pensons qu'une séquence d'enseignement basée sur une analyse d'articles d'écologie et de systématique serait féconde pour construire la pluralité du concept de végétal entre les classifications fonctionnelle et phylogénétique. En raison de l'importante rectification historique du groupe des végétaux dans la systématique, un travail historique fondé sur plusieurs articles majeurs du XX^{e} siècle devrait permettre aux étudiants de construire les raisons de l'évolution du groupe des végétaux en analysant les problèmes auxquels se sont attaqués plusieurs systématiciens ainsi que le type de caractères étudiés et de méthode classificatoire. Cette séquence devrait contribuer à l'identification des modes de raisonnements spécifiques associés à chaque type de classification, en particulier l'importance de la prise en compte de caractères homologues dans les classifications phylogénétiques et non dans les classifications fonctionnelles. Outre la construction conceptuelle, nous pensons qu'une telle séquence pourrait donner à voir certains aspects de la nature de la science, principalement la dimension construite et le caractère provisoire des savoirs scientifiques, le lien au problème des savoirs scientifiques, les conditions de possibilités techniques et théoriques de l'évolution des idées mais également la mise en jeu de valeurs et d'idéologies dans l'activité scientifique.

Dans un premier temps, nous présenterons le cadre théorique et méthodologique de l'expérimentation didactique, ce qui nous conduira à préciser les questions de recherche. Puis nous présenterons la séquence d'enseignement-apprentissage et nous justifierons les choix didactiques de cette reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences et un travail sur des articles scientifiques. Dans un quatrième temps, nous développerons la méthodologie d'analyse des données pour chaque grande question de recherche. Viendra ensuite l'analyse des résultats et leur discussion, avant de conclure ce chapitre.

1. Cadre théorique et méthodologique de l'expérimentation didactique

Notre expérimentation didactique se positionne dans le cadre méthodologique de la « reconstruction didactique basée sur des matériaux historiques » développé par Cécile de Hosson (2011). Au cours du chapitre 1 (cf. p. 56), nous avons justifié le choix de ce cadre pour notre propre recherche. Nous souhaitons discuter à présent de notre positionnement méthodologique par rapport à l'ingénierie didactique (Artigue, 1988), développée à l'origine dans le champ de la didactique des mathématiques et dans laquelle C. de Hosson inscrit la reconstruction didactique. Nous entendons comparer la méthodologie de l'ingénierie didactique avec celle développant des situations forcées (Orange, 2010a, 2010b) pour mieux positionner nos propres travaux.

1.1. Cadre méthodologique de notre reconstruction didactique : ingénierie didactique ou situation forcée ?

C. de Hosson explicite l'inclusion du cadre de la reconstruction didactique dans le paradigme plus large de l'ingénierie didactique, développé par M. Artigue[136], mettant en avant le concept de validation interne des hypothèses de recherche, validation basée sur la confrontation entre les analyses *a priori* et *a posteriori*. Revenons au texte fondateur de Michèle Artigue (1988) afin de bien comprendre les spécificités de cette méthodologie.

> « L'objectif de l'analyse *a priori* est donc de déterminer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et leur sens. Pour ce, elle va se fonder sur des hypothèses et ce sont ces hypothèses dont la validation sera, en principe, indirectement en jeu, dans la confrontation opérée dans la quatrième phase entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori. »* (Artigue, 1988, p. 294)

> « Cette phase [expérimentation en classe] est suivie d'une phase **d'analyse dite *a posteriori*** qui s'appuie sur l'ensemble des données recueillies lors de l'expérimentation : observations réalisées des séances d'enseignement mais aussi productions des élèves en classe ou hors classe. Ces données sont souvent complétées par des données obtenues par l'utilisation de méthodologies externes : questionnaires, entretiens individuels ou en petits groupes, réalisés à divers moments de l'enseignement ou à son issue. Et, comme nous l'avons déjà indiqué, **c'est sur la confrontation des deux analyses : analyse *a priori* et analyse *a posteriori* que se fonde essentiellement la validation des hypothèses** engagées dans la recherche. » (Ibid., p. 297), *c'est nous qui soulignons*.

[136] « En termes d'évaluation, nous avons choisi de nous situer dans le registre des études de cas et d'associer notre projet de reconstruction didactique à celui d'Ingénierie Didactique (Artigue, 1988) pris en tant que paradigme de validation interne de « réalisations didactiques » et fondé sur la confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori* » (de Hosson, 2011, p. 35)

L'ingénierie didactique se positionne contre les méthodes de recherche avec validation externes (au sens d'externes à la classe) jugées « insuffisantes à attraper la complexité du système étudié » (Artigue, 1988, p. 284)[137].

Nous partageons le positionnement de M. Artigue quant à l'insuffisance des analyses externes mais, à la suite de C. Orange, nous entendons comparer cette méthodologie à celle de « situation forcée », pour clarifier notre propre positionnement méthodologique. Les situations forcées ont été développées par C. Orange et D. Orange Ravachol (2007) puis discutée en 2010 (Orange, 2010a, 2010b). Cet auteur explicite cette méthodologie en comparaison avec celle de l'ingénierie didactique. L'ancrage de l'ingénierie didactique dans la théorie des situations didactiques (TSD)[138] est pointé comme problématique pour l'utilisation de cette méthodologie dans un autre cadre théorique : celui de l'apprentissage par problématisation. La TSD modélise les apprentissages sous forme de jeu dans lequel la stratégie gagnante implique d'utiliser la connaissance visée par l'apprentissage. C. Orange (2007, p. 37) discute de la pertinence de cette modélisation en SVT : « les connaissances sont définies comme des solutions optimales quand la problématisation met avant tout l'accent sur la construction des problèmes, et surtout parce que nous avons des difficultés épistémologiques à définir, en SVT, ce qu'est une solution optimale ».

Le concept de « situation forcée » entend répondre à ces différentes critiques.

> « Les situations ainsi produites sont des mixtes entre les propositions des chercheurs et l'expertise de l'enseignant. Nous les appelons situations forcées car elles tentent de pousser le plus possible le travail de la classe, en fonction des objectifs de recherche de l'équipe, tout en respectant le fonctionnement normal de cette classe, ce dont le maître est garant. Elles ne visent aucunement à construire des séquences « modèles » et ne sont certainement pas reproductibles ; **leur but est de d'explorer le champ didactique en y créant des phénomènes de façon à mieux comprendre le fonctionnement des apprentissages scolaires et à faire évoluer le cadre théorique de l'équipe** » (Orange, 2010a, p. 2), *c'est nous qui soulignons*.
>
> « Elles sont dites forcées car elles tentent de mener le plus loin possible les investigations liées à ces questions de recherche, de sorte qu'elles présentent souvent des aspects qui peut sembler exagérés pour ce qui serait un travail dans la classe non lié à la recherche. Cependant **ces « forçages » et leurs analyses donnent à voir des aspects nouveaux qui ouvrent des possibles pour l'enseignement et précisent leurs conditions de réalisation** » (Orange, 2012b, p. 123-124), *c'est nous qui soulignons*.

[137] « Les recherches ayant recours à des expérimentations en classe se situent le plus souvent dans une approche comparative avec validation externe basée sur la comparaison statistique des performances de groupes expérimentaux et de groupes témoins » (Artigue, 1988, p. 284).

[138] « Elle adhère fortement à la **théorie des situations didactiques** et importe avec elle des éléments, comme par exemple le concept de situation fondamentale, qui ne correspondent pas ni à notre cadre théorique ni à l'épistémologie de toutes les disciplines (Orange, 2007) » (Orange, 2010a, p. 2).

Nous tenons à souligner le fait qu'il s'agit d'une méthodologie à finalité théorique, elle vise à mieux comprendre les apprentissages scolaires et à développer le cadre théorique de la recherche. Mais travaillant sur un système éminemment complexe et plurifactoriel, peut-on isoler des variables[139] comme le propose l'ingénierie didactique ?

Le tableau 25 compare ces deux méthodologies d'expérimentation didactique.

	Méthodologie de l'ingénierie didactique	**Méthodologie des situations forcées**
Type de recherche	Étude de cas	
Objectifs	Double objectif : recherche (explorer le champ didactique) et/ou production d'une séquence d'enseignement évaluée par la recherche (innovation contrôlée)	Objectif de recherche uniquement : explorer le champ didactique. Pas d'objectif de production d'une séquence « modèle » et reproductible
Type de validation	Validation interne des hypothèses par confrontation entre analyse *a priori* et analyse *a posteriori*	Analyse essentiellement *a posteriori* « Les phénomènes didactiques repérés par cette méthode n'étant pas construits *a priori*, ils doivent être analysés de manière critique et théorisés *a posteriori*. » (2010, p. 10)
Place relative des chercheurs et du professeur	Situations élaborées par les chercheurs et expérimentées en classe	Les situations produites sont des mixtes entre les propositions des chercheurs et l'expertise de l'enseignant.
Ancrage à une théorie didactique	Initialement pensé en proximité avec la théorie des situations didactiques (concepts de situation fondamentale, situation adidactique…)	Cadre de l'apprentissage par problématisation

Tableau 25 : comparaison des méthodologies de l'ingénierie didactique et des situations forcées

[139] « Avec ces situations, on entre dans des domaines qui n'ont pas encore été explorés, à la fois par le chercheur et par le professionnel, et qu'**il n'est pas possible de réduire à des variables didactiques.** Arrêtons-nous un moment sur ce dernier point : cette impossibilité de réduire ces situations à des variables n'est pas, selon nous, uniquement explicable par l'état d'avancée de la recherche ; nous pensons que toute situation didactique n'est pas réductible *a priori* à des variables, même si l'analyse *a posteriori* permet d'en repérer quelques-unes ; ce qui ne veut pas dire qu'il n'est pas possible de construire des repères pour ces situations et ces séquences. (…) Les **situations produites sont ainsi des solutions contextualisées qui sont en partie problématisées *a priori* et en partie *a posteriori***. (…) Elles livrent aux recherches didactiques de nouveaux phénomènes, produits dans un cadre théorique, et auxquels ce cadre peut donner une signification par ces problématisations *a priori* et *a posteriori*. (…) Elles livrent aux experts (enseignants, formateurs) de nouvelles situations qui n'ont pas vocation à être idéales mais qui élargissent le champ des possibles professionnels » (Orange, 2010b, p. 82-83), *c'est nous qui soulignons*.

Notre recherche a un objectif théorique d'exploration du champ didactique mais aussi d'ouvrir le champ des possibles pour les enseignants. Les deux méthodologies sont compatibles avec cette double ambition. Mais notre thème de recherche étant peu exploré, il nous semble difficile de définir par une analyse *a priori* des variables de commande permettant de « contrôler les comportements des élèves et leur sens » (Artigue, 1988, p. 294). Bien que les choix didactiques qui fondent notre séquence seront analysés et justifiés, il nous semble impossible de définir à l'avance une trajectoire précise du processus de problématisation. Nous souhaitons donc étudier les phénomènes émergents par une analyse *a posteriori* et questionner en retour le fondement des choix didactiques réalisés. De plus, notre recherche se positionne dans le cadre théorique de la problématisation et non dans la théorie des situations didactiques. Pour ces différentes raisons, notre reconstruction didactique s'apparente davantage aux situations forcées qu'à l'ingénierie didactique.

C. Orange insiste fortement sur la dimension collective de cette méthodologie dans laquelle les situations « sont construites au sein d'un groupe de recherche comportant des chercheurs en didactique et des enseignants experts ». Le fonctionnement de ce groupe de recherche implique une dimension collaborative particulière[140].

Le fonctionnement de notre recherche se distingue partiellement de ce qui caractérise la construction progressive des situations forcées, grâce à des ajustements réguliers en cours de séquence. Dans notre cas, la séquence a été pensée pour une large part par les chercheurs, même si certains ajustements ont eu lieu avec les enseignants de biologie et d'anglais mettant en œuvre la séquence.

Nous avons fait le choix d'élaborer une reconstruction didactique qui prend appui sur des articles scientifiques, (cf. chapitre 1, p. 61). Justifions à présent pourquoi ne pas adapter les articles et soumettre les textes primaires aux étudiants. Présentons également les éléments qui nous permettent de penser qu'une formation basée sur des articles pourrait donner à voir l'image de la nature de la science mobilisée par les étudiants.

[140] « Avant chaque séance, le groupe construit la préparation en fonction de ces doubles objectifs et de ce qui s'est passé avant. Les chercheurs didacticiens, mais aussi les enseignants du groupe, proposent des situations (en fonction notamment des recherches déjà réalisées). L'enseignant de la classe dit ce qui lui semble possible ou non, ce qui conduit à un choix de situations qui prend notamment en compte, par l'intermédiaire de son expertise, les caractéristiques de la classe et des élèves. La préparation dans le détail (y compris matérielle) est partagée dans le groupe. Après chaque séance un *débriefing* est fait. Il est suivi (immédiatement ou non) de la préparation de la séance suivante » (Orange, 2010b, p. 77).

1.2. Utilisation de la littérature scientifique primaire dans la reconstruction didactique

1.2.1. Pourquoi travailler sur des articles scientifiques primaires non adaptés ?

Au cours du chapitre 1, nous avons explicité les raisons de l'utilisation didactique d'articles scientifiques, en soulignant notamment en quoi l'analyse d'articles ouvre une fenêtre sur les pratiques épistémiques en science (Osborne, 2009) et permet aux étudiants d'étudier la manière dont les scientifiques construisent leur argumentation.

Nous faisons le choix de ne pas adapter les articles mais de faire lire et analyser par les étudiants les articles primaires en anglais. Nous nous positionnons donc parmi les travaux utilisant la littérature scientifique primaire non adaptée (Primary Scientific Literature, PSL). En effet, pour travailler sur l'argumentation des chercheurs, nous considérons plus riche de donner à lire les textes originaux, sans risquer de les dénaturer par une traduction. Ce choix peut sembler raisonnable au regard du niveau élevé des étudiants (master). De plus, sur le plan de la formation de futurs enseignants, il nous paraît pertinent de montrer aux étudiants qu'une lecture d'articles scientifiques en anglais est faisable et leur sera utile durant toute leur carrière professionnelle afin d'actualiser leurs connaissances et éventuellement proposer à leur tour à leurs élèves de travailler sur de la littérature scientifique, en l'adaptant au niveau des élèves.

1.2.2. Articles scientifiques et nature de la science

Outre le rôle essentiel que peut jouer la lecture d'écrits scientifiques sur la construction de savoirs scientifiques, elle ouvre une fenêtre épistémologique sur la nature de la science (2009)[141].

Bien que notre objectif ne soit pas de faire évoluer l'image de la nature de la science (NoS) des étudiants, l'analyse de la littérature scientifique devrait en donner à voir plusieurs facettes. Selon les recherches sur le thème NoS, certaines caractérisent la nature de la science d'un point de vue théorique, alors que d'autres s'intéressent aux représentations des élèves et des enseignants à différents niveaux. D'autres encore analysent l'effet de situations d'enseignement-apprentissage, de formation sur les connaissances épistémologiques des élèves ou des enseignants. L'objet de cette section n'est pas de réaliser une revue de littérature sur le thème de la nature de la science, puisque de telles synthèses existent déjà, telles celles

[141] « Learning to read scientific text leads not only to the possibility of learning the substantive content of science, but also to learning its epistemology »(2009, p. 399).

réalisées par Abd-El-Khalick et Lederman (2007) ou Lederman (2000a). Nous définirons succinctement l'objet « NoS » pour situer notre propre recherche.

Lederman (2006) préfèrerait restreindre la NoS à la nature des savoirs scientifiques en excluant la démarche scientifique[142]. Certains auteurs, comme G. Irzik & R. Nola (2010), ne partagent pas l'idée d'exclure la démarche scientifique de la NoS, trouvant ce choix artificiel[143]. N. Lederman (2006, 2007) récapitule ainsi les caractéristiques des savoirs scientifiques : ceux-ci sont en lien avec des données empiriques (observations, expérimentations) ; ils résultent d'une activité humaine et sont influencés par le contexte culturel et social. Ils ne sont jamais absolus et définitifs mais sujet à des changements. Enfin, ils sont en partie subjectifs (influencés par les cadres théoriques mobilisés, les expériences préalables des chercheurs, leurs valeurs et croyances). Cet auteur distingue également observation et inférence, théories et lois[144].

À cette liste de caractéristiques, d'autres que lui ajoutent la dimension théorique et explicative de la science, le caractère testable et répétable des expérimentations. À l'aune de sa puissance explicative et prédictive, une théorie scientifique est à examiner au regard de valeurs de cohérence et de simplicité (parcimonie)[145].

Ces différentes caractéristiques sont présentées comme relativement consensuelles dans la communauté (Irzik & Nola, 2014). Mais certains auteurs appellent à une spécification plus marquée prenant en compte davantage la diversité des disciplines scientifiques et des démarches et modes de raisonnements associés (Ibid., p. 1002). En effet, certaines sciences sont expérimentales (sciences fonctionnalistes) alors que d'autres ne le sont pas (sciences

[142] « Perhaps, the phrase "nature of science" has caused the confusion and the phrase "nature of scientific knowledge" might be more accurate. The conflation of NOS and scientific inquiry has plagued research on NOS from the beginning »(Lederman 2006, p. 4).

[143] « But **this way of excluding scientific inquiry from NOS is artificial**; after all, scientific inquiry such as data collecting, classifying, analyzing, experimenting and making inferences are all parts of science and **this fact itself should be included in NOS** » (Irzik & Nola, 2011, p. 593), *c'est nous qui soulignons*.

[144] « My research team and colleagues over the past 20 years have focused on the following characteristics of scientific knowledge in our research on nature of science:

• The distinction between observation and inference

• The relationship and distinction between scientific laws and theories

• Scientific knowledge is, at least partially, based on and/or derived from human imagination and creativity.

• Scientific knowledge necessarily is partially subjective and can never be totally objective.

• Science as a human enterprise is practiced in the context of a larger culture and its practitioners (scientists) are the product of that culture. Science, it follows, affects and is affected by the various elements and intellectual spheres of the culture in which it is embedded.

• Scientific knowledge is never absolute or certain; it is subject to change.

• Scientific knowledge is empirically based »(Lederman 2006, p. 4).

[145] « Others added that science is theoretical and explanatory; scientific claims are testable and scientific tests are repeatable; science is self-correcting and aims at achieving values such as high explanatory and predictive power, fecundity (fruitfulness), parsimony (simplicity) and logical coherence (consistency) (Cobern and Loving 2001; Smith and Scharmann 1999; Zeidler and others 2002) » (Irzik & Nola, 2014, p. 1001).

historiques). La fonction prédictive de la science n'est pas valable pour toutes les disciplines dans lesquelles la démarche vise à la rétrodiction (comme la cosmologie ou la paléontologie). Si la notion de loi - relation d'ordre entre grandeurs - est centrale en physique, elle reste très discutée en biologie (Gayon, 2004).

Bien que la science doit être appréhendée globalement, Irzik & Nola (2014) proposent d'en distinguer deux dimensions : d'une part, une dimension cognitive et épistémique et d'autre part une dimension humaine, sociale et institutionnelle.

Ces deux dimensions de la science restent complémentaires et en interaction. Laurence Maurines et son équipe, travaillant en France sur la NoS, indiquent que « l'opposition entre une vision internaliste et rationaliste et une vision externaliste et relativiste des sciences et de leur avancée semble en effet en voie de dépassement » (Maurines, Gallezot, Ramage, & Beaufils, 2013, p. 22).

Pour autant, notre recherche possède une centration conceptuelle forte, ce qui nous conduit à mettre l'accent sur la première dimension épistémique de la NoS et moins sur la dimension sociale de l'activité scientifique. À travers l'étude de différents articles scientifiques, nous ne porterons pas d'attention sur le fonctionnement de l'institution scientifique (notamment le processus de révision par les pairs, la structuration de la recherche, l'influence de la société sur la recherche, etc.).

Souhaitant intégrer dans notre expérimentation didactique une séance de bilan basée sur la réalisation de cartes conceptuelles par les étudiants, il nous semble important de présenter les fondements théoriques de ce choix didactique.

1.3. Réalisation de cartes conceptuelles

1.3.1. Qu'est-ce qu'une carte conceptuelle ?

Les cartes conceptuelles (ou *concept maps* en anglais, notées cmaps) sont des représentations spatiales qui « assurent une fonction d'organisation des connaissances relatives à des concepts » (Tiberghien, 1994, p. 54). Elles ont été développées dans les années 1970 par l'américain J. Novak et ses collègues (Novak & Gowin, 1984). Elles se distinguent d'autres outils graphiques par la spécification de la nature des liens unissant deux « nœuds », un nœud correspondant à un concept au sens plein du terme ou à un autre élément de discours. La figure 59 présente un exemple de carte conceptuelle.

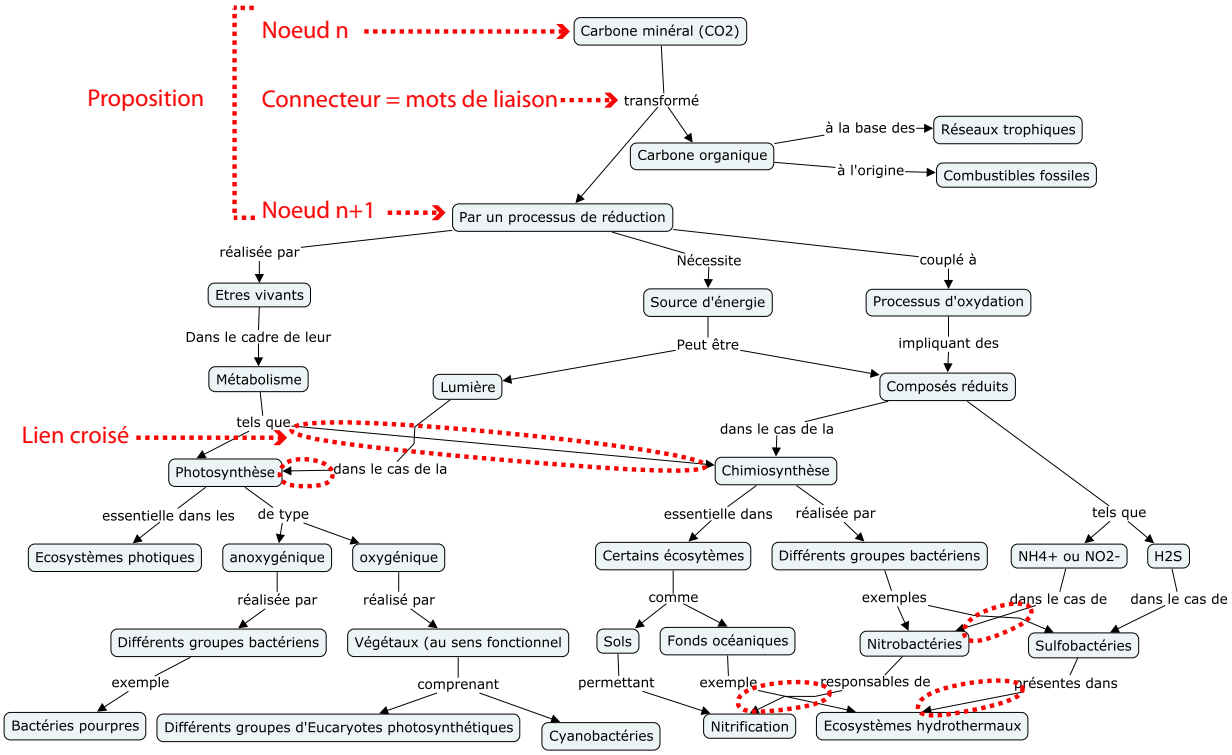


Figure 59 : exemple de carte conceptuelle en réponse à la question : « Comment le carbone minéral est-il transformé en carbone organique et quelles en sont les conséquences écologiques ? »

L'unité de signification de la carte est une proposition constituée par deux nœuds (ou éléments de discours) reliés par un connecteur, qui est formé d'un ou de plusieurs mots de liaison. La présence de ces mots de liaison distingue les cartes conceptuelles des cartes heuristiques (également appelées cartes mentales ou *mindmap*). Ils assurent une fonction essentielle en précisant la nature des liens sémantiques. Dans la carte présentée en figure 59, une première proposition est « carbone minéral (CO_2) / transformé / par un processus de réduction ». Dans une carte heuristique, on trouverait « carbone minéral (CO_2) / processus de réduction ». L'absence du mot de liaison « transformé » rendrait plus énigmatique la relation entre les deux éléments de discours et obligerait le lecteur de la carte (professeur, chercheur, autre élève) à un travail d'inférence difficile à contrôler. Ainsi la possibilité de construire des propositions constituant de véritables unités sémantiques explique l'usage didactique des cartes conceptuelles. La carte peut comprendre également des liens croisés (ou *crosslink*) mettant en relation plusieurs branches de la carte, qui prend alors une structure en réseau. La présence de liens croisés dans la carte est jugée comme le reflet d'une plus grande complexité[146] du réseau conceptuel (Kinchin 2001; Kinchin, Hay, & Adams, 2000; Novak & Cañas, 2008).

[146] « However, a pure tree structure is rarely used in CMaps and is regarded as a **"poor" CMap** (Novak, 1998). Instead, **cross-links are encouraged** because they reflect **interconnectedness of different map segments**

Comme nous l'avons laissé entendre précédemment, les nœuds sont des objets de discours de différentes natures : certains termes réfèrent à des concepts, mais ils n'ont ce statut pour le concepteur de la carte que s'il a réalisé un travail d'abstraction permettant la conceptualisation. Les nœuds peuvent aussi référer à d'autres types de termes comme des noms propres (pour nous, les auteurs de articles étudiés), des dates, des lois physiques, des principes structurants, des données empiriques. Nous pouvons par exemple imaginer qu'une carte du concept de photosynthèse comprenne des nœuds comme « production de dioxygène » ou « consommation de dioxyde de carbone », qui ne sont pas en eux-mêmes des concepts mais des données empiriques jouant la fonction d'attributs du concept formel de photosynthèse. Mais si chaque nœud n'est pas nécessairement un concept, on peut penser que la carte dans sa globalité prend une dimension conceptuelle par la mise en relation de différents éléments de discours et par sa fonction d'abstraction, qui pourrait renvoyer au processus de schématisation tel que le définit Jean-Blaise Grize[147].

Notre attachement à cet outil est lié au travail de conceptualisation qu'il permet, jouant un rôle fondamental dans les apprentissages scientifiques. Il nous semble donc, à ce titre, essentiel d'expliciter notre position théorique quant au rôle de la conceptualisation dans l'apprentissage.

Mais travailler à l'élaboration d'un réseau conceptuel par une mise en carte implique une clarification théorique sur la notion de concept et son rôle dans l'apprentissage scientifique.

1.3.2. Qu'est-ce qu'un concept ?

« Toute connaissance du monde passe par une identification puis une représentation des choses et des phénomènes sous la forme de concepts » (Prévost & Jacobi, 1994, p. 120). Un concept peut être défini, en première approche, comme une représentation générale et abstraite d'une réalité, stabilisée dans une communauté à un moment donné. Astolfi *et al.* (1997) le définissent par trois dimensions :

- une dénomination qui permet de « l'étiqueter » : le signifiant
- une définition en compréhension, par l'identification des attributs qui sont communs aux exemples : le signifié

within the hierarchy, resulting in a more complex graph structure » (Derbentseva, Safayeni, & Cañas, 2007, p. 454), *c'est nous qui soulignons*.

[147] « Grize définit une schématisation comme « une représentation discursive orientée vers un destinataire de ce que son auteur conçoit ou imagine d'une certaine réalité », une façon « de faire voir quelque chose à quelqu'un » (Grize, 1996, p. 50), ainsi que « son résultat virtuel qui consiste en un micro-univers proposé devant l'objecteur virtuel B » (Grize, 1982, p. 152) » (Lhoste 2008, p. 142)

- une définition en extension, à partir d'une liste d'exemples : le référent.

Mais cette première définition d'un concept ne prend pas en compte une dimension essentielle, à savoir que les concepts n'ont de sens que dans la relation avec les problèmes qui les fondent. L'importance des problèmes a été l'objet d'une section dans le chapitre 1 (cf. p. 59). Rappelons ici le lien entre concept et problème : « définir le concept, c'est formuler un problème » (Macherey, 1964/2009, p. 54). À la suite de G. Bachelard et J. Dewey, Y. Lhoste (2008) décrit les savoirs scientifiques comme étant le problème, sa solution et le lien qui les unit[148].

De plus, un concept scientifique fonctionne toujours en relation avec d'autres concepts. II est un nœud dans un réseau de relations, cohérent et organisé, et non un élément disposé à côté d'autres par simple juxtaposition (Astolfi *et al.*, 1997). Cette organisation systémique des concepts scientifiques les distingue des concepts quotidiens qui ont une portée locale (Vygotski, 1934/1997). Le réseau conceptuel est ainsi constitué de concepts, dont certains constituent les attributs d'autres concepts. Ces concepts attributs sont donc des outils nécessaires à la définition d'un concept-objet.

La construction de concepts permet de dépasser la singularité des objets étudiés, de donner aux savoirs une dimension plus systémique et donc d'accéder à un certain niveau de compréhension du monde. La conceptualisation participe d'un processus d'abstraction. Mais le processus d'abstraction impliqué n'est pas unique et absolu. Définir un concept, c'est se doter d'outils intellectuels pour résoudre un problème donné. Comme nous l'avons montré précédemment, il n'existe pas un unique concept de végétal mais une multiplicité selon les questions auxquelles le concept doit répondre.

L'importance théorique de la notion de réseau conceptuel motive notre choix didactique de faire concevoir une carte conceptuelle aux étudiants.

[148] « Il n'y a pas de savoirs en dehors des problèmes avec lesquels ils entretiennent une relation dynamique (Bachelard, 1938; 1949). La déconnexion entre un savoir qui existerait en soi et les problèmes est illusoire (Dewey, 1993). Ainsi le problème ne disparaît pas lors de sa résolution. C'est le problème, sa solution et le rapport qui lie problème et solution qui constituent le savoir » (Lhoste, 2008, p. 54-55).

1.3.3. Importance des cartes conceptuelles dans la recherche en didactique des sciences

- **Diversité des usages des cartes conceptuelles**

Les concepts scientifiques étant caractérisés par leur organisation en système, la réalisation de représentations graphiques de concepts semble constituer un outil à fort potentiel pour l'enseignement et la recherche en didactique des sciences. En 1990, la revue américaine *Journal of Research in Science Teaching* consacrait un numéro aux cartes conceptuelles (Vol. 27, n°10). En 1994, la revue française *Didaskalia* faisait de même. Au niveau international, les recherches portant sur les cartes conceptuelles sont nombreuses et diverses. Un colloque international bisannuel (CMC *Concept Mapping Conférence*[149]) est consacré aux cartes conceptuelles depuis 2004, indiquant l'existence d'une communauté de recherche sur ce thème. Dans certaines études, les cartes conceptuelles sont réalisées par les chercheurs pour modéliser les connaissances des élèves [e.g. Novak et Musonda (1991)][150], modéliser le discours d'enseignants (Amundsen, Weston, & McAlpine, 2008; Manrique, de Hosson, & Robert, 2016) ou encore modéliser des savoirs afin de décrire de manière synthétique des savoirs de référence (Novak, 2010, p. 26), un curriculum (Kinchin, 2011, p. 186), réaliser une étude comparative telle qu'une étude de transposition didactique ou muséographique [e.g. Mortensen (2010)]. Dans d'autres études, les cartes conceptuelles sont réalisées par les élèves eux-mêmes. Les cartes conceptuelles constituent selon les cas un outil d'enseignement que la recherche en didactique étudie du point de vue de ses effets sur l'apprentissage ou bien un outil de recherche visant à évaluer les connaissances des élèves et leur mode de raisonnement. Dans le premier cas, les auteurs mettent en avant le rôle métacognitif que peut jouer la construction de cartes conceptuelles, facilitant la structuration des connaissances et leur transfert dans de nouvelles situations (Chevron, 2014). Pour certains chercheurs, il s'agit même de l'un des outils métacognitifs les plus puissants[151].

Pour plus de détails sur cet usage des cartes conceptuelles comme outil d'enseignement, nous renvoyons le lecteur vers l'article de Horton *et al. (1993)* consistant en une méta-analyse portant sur dix-neuf études et qui montre un effet globalement positif sur la réussite des

[149] Site web de la conférence CMC : http://cmc.ihmc.us (consulté le 23 novembre 2015)

[150] Il s'agit de la première utilisation de cartes conceptuelles par J. Novak et ses collègues, transformant des entretiens d'élèves en cartes conceptuelles, dans le cadre d'une étude longitudinale sur 12 ans à Ithaca (USA) ayant débuté en 1971 et visant à mesurer l'effet d'un enseignement scientifique basé sur des audiotutoriels chez des élèves (grades 2 à 12, soit l'équivalent de CE1 à terminale).

[151] « The concept map has been described as 'the most important meta-cognitive tool in science education today' by Mintzes et al. (1997: 424) » (Kinchin, 2001, p. 1257).

élèves. Plus récemment, la méta-analyse de Nesbit & Adesop (2006) basée sur cinquante-cinq études conclue que l'utilisation des cartes conceptuelles dans l'enseignement augmente globalement la mémorisation et facilite le transfert de connaissances. Mais en même temps, les auteurs soulignent l'hétérogénéité des études, questionnent la significativité de l'effet et en appellent à de nouvelles recherches.

Notre recherche se positionne parmi celles qui utilisent les cartes conceptuelles comme un outil de recherche pour étudier les systèmes explicatifs des apprenants et leur évolution au cours de l'enseignement. Ces recherches sont nombreuses, citons notamment les articles de Khantine-Langlois & Biau (2009) ; Kinchin (2011) ; Mintzes, Wandersee, & Novak (2001) ; Wallace & Mintzes (1990). Présentons à présent notre positionnement théorique quant à l'usage que nous faisons des cartes conceptuelles dans notre recherche.

- **Positionnement théorique**

➢ **Organisation hiérarchique des cartes conceptuelles**

D'un point de vue théorique, Joseph Novak a développé les cartes conceptuelles en s'appuyant sur la théorie de psychologie cognitive de l'apprentissage par assimilation de l'américain, David Ausubel, disciple de Jean Piaget. Il distingue l'apprentissage significatif (traduction de l'expression *meaningful learning*) de l'apprentissage par cœur (*rote learning*) et présume que la mémoire est organisée de façon hiérarchique[152].

Ce positionnement théorique a une conséquence directe au niveau de la réalisation de carte conceptuelle, qui devrait être hiérarchique pour Novak *et al.* La hiérarchie constitue alors un critère pour évaluer de « bonnes » cartes et une préconisation pour organiser un enseignement « optimal » basé sur cet outil[153].

Nous ne partageons pas cette position théorique qui conduit à imposer une structure hiérarchique aux élèves. En effet, nous ne voyons pas pourquoi le réseau conceptuel serait

[152] « Fortunately for our research group, **Ausubel's assimilation theory of meaningful learning** was published in 1963, and this provided a **solid theoretical foundation** for the work we were interested in doing. The key idea in Ausubel's theory is the distinction between **learning by rote versus learning meaningfully** » (Novak 2010, p. 21), *c'est nous qui soulignons.* « The process of meaningful learning builds an integrated framework of concepts and propositions **organized hierarchically** for a given domain of knowledge. Building expertise requires a continuous process of meaningful learning » (2010, p. 22), *c'est nous qui soulignons*.

[153] « There are two features of concept maps that are important in the facilitation of creative thinking: **the hierarchical structure that is represented in a good map** and the ability to search for and characterize new cross-links »(Novak & Cañas, 2008, p. 2). « The hierarchical organization of concept maps suggests **more optimal** sequencing of instructional material » (Ibid., p. 28), *c'est nous qui soulignons*.

nécessairement hiérarchique. Nous nous reconnaissons ainsi davantage dans les propos de Araceli et Shavelson (1996) et Tribollet *et al.* (2000)[154].

- **Importance de la situation-problème**

Par ailleurs, nous partageons la position de Novak concernant l'importance de la « *focus question* »[155] qui renvoie à la situation problème. Ce positionnement est en accord avec notre attachement théorique à la problématisation.

D'autres auteurs (Derbentseva *et al.*, 2007) ont étudié l'effet de la question posée sur la structure de la carte réalisée. Ils ont comparé les cartes produites suite à une question descriptive de type « Qu'est-ce que le concept X ? » par rapport à une question explicative de type « Que se passe-t-il quand le concept X change ? » ou « Comment le concept X fonctionne ? ». Leur étude a révélé qu'une question menant à une recherche d'explications génère des cartes avec une structure en réseau et non en simple « arbre » possédant davantage de liens croisés, interprétés comme favorisant un raisonnement dynamique ('*dynamic thinking'*).

- **Un appel à de nouvelles recherches**

Enfin, un article de revue faisant référence a été publié par Ruiz-Primo & Shavelson (1996) et compare la manière d'utiliser les cartes conceptuelles comme outil d'évaluation dans vingt-et-une recherches antérieures. Les auteurs concluent en appelant de leurs vœux de nouvelles recherches empiriques sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil d'évaluation du mode de raisonnement des apprenants.

D'autres auteurs (Nesbit & Adesope, 2006) en appellent également à examiner le processus par lequel les élèves apprennent avec les cartes conceptuelles[156].

---

[154] **« Methodologically and conceptually, there is no need to impose a hierarchical structure.** If the content structure is hierarchical, a hierarchical map should be observed » (Ruiz-Primo & Shavelson, 1996, p. 578). « (…) nous pensons que **la structuration de la pensée de l'élève apparaîtra sur la carte mais qu'elle n'est pas forcément hiérarchisée, et qu'elle peut évoluer pendant l'enseignement et au cours des activités de réflexions proposées sur cette structuration.** Nous n'émettons aucun jugement de valeur (ni classement) sur une structure plutôt qu'une autre si ce n'est que la structure va d'une complexité croissante de la chaîne au réseau » (Tribollet et al., 2000, p. 62), *c'est nous qui soulignons*.

[155] « A good way to define the context for a concept map is to construct a **Focus Question, that is, a question that clearly specifies the problem or issue the concept map should help to resolve.** Every concept map responds to a focus question, and a good focus question can lead to a much richer concept map. When learning to construct concept maps, learners tend to deviate from the focus question and build a concept map that may be related to the domain, but which does not answer the question. It is often stated that **the first step to learning about something is to ask the right questions** » (Novak & Cañas, 2008, p. 11-12), *c'est nous qui soulignons*.

[156] « Instead, investigations should examine the processes by which students learn with concept maps and their effects on higher-level learning goals such as problem-solving transfer, application, and analysis (Anderson & Krathwohl, 2001); conceptual change (Novak, 2002); and the development of learning skills (Chang, Sung, & Chen, 2002) » (2006, p. 434-435).

Nous souhaitons donc nous inscrire dans cet appel au développement de recherches visant à examiner sur un plan méthodologique l'usage des cartes conceptuelles pour évaluer les connaissances des élèves et leur mode de raisonnement.

Cette clarification théorique et méthodologique étant réalisée, nous proposons à présent de reformuler et préciser les questions de recherche fondant notre troisième et dernière enquête.

2. Questions de recherche

Nos questions de recherche possèdent trois visées complémentaires correspondant aux trois sommets d'un triangle (figure 60). Elles relèvent de la recherche de significations (QR1), de la recherche de faisabilité (QR2), selon la distinction des différents paradigmes de recherche en didactique proposée par Astolfi (1993). Le troisième pôle de questions est de nature méthodologique ; il entend étudier les conditions de possibilité dans lesquelles la réalisation de cartes conceptuelles pourrait constituer un outil de recherche didactique au service de l'étude du raisonnement scientifique et de la problématisation.

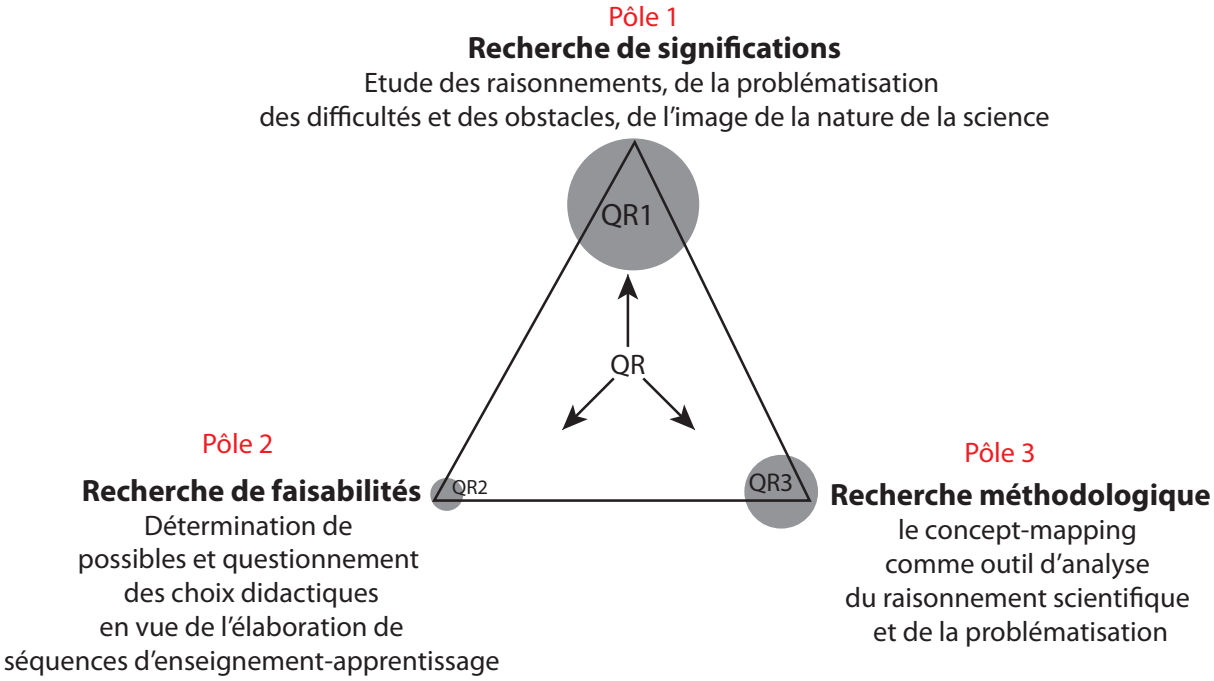


Figure 60 : les trois pôles de questions de recherche (QR) liées à l'expérimentation didactique ; la surface du cercle gris indique l'importance relative de chaque pôle dans la thèse

2.1. Recherche de significations : étude des raisonnements et de l'image de la nature de la science des étudiants

C'est à cette famille de questions que l'on rattache la visée développée par Orange (2010a, p. 2) « d'explorer le champ didactique en y créant des phénomènes de façon à mieux comprendre le fonctionnement des apprentissages scolaires et à faire évoluer le cadre théorique de l'équipe ». Dans notre recherche, il s'agit d'étudier les raisonnements et les difficultés des étudiants relatifs aux principes spécifiques des différentes classifications biologiques ainsi que le processus de problématisation qu'ils mettent en œuvre dans le cadre de la situation didactique expérimentée. L'expérimentation didactique entend étudier également l'image de la nature de la science (NoS) que mobilisent des étudiants de master MEEF, futurs professeurs de SVT.

Le tableau 26 présente les questions relevant du pôle 1 (recherches de significations).

QR1a. Comment différencient-ils les principes spécifiques des différentes classifications (fonctionnelle de type écologique et phylogénétique), que l'on peut distinguer notamment par l'usage de l'homologie ainsi que les conséquences d'une perte de fonction ? Quelles difficultés rencontrent les étudiants et quels obstacles sont mobilisés ?
QR1b. Dans quelle mesure les étudiants établissent la relation entre la pluralité des conceptions des végétaux et les différentes classifications lors de la réalisation de la carte conceptuelle ?
QR1c. Quelles raisons identifient les étudiants pour expliquer la rectification du groupe des végétaux entre les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes ? Comment expliquent-ils la disparition ou la délimitation du groupe des végétaux dans les arbres phylogénétiques actuels ?
QR1d. Existent-ils des écarts entre la problématisation de référence développée par les auteurs et celle qui est construite par les étudiants à propos de ces mêmes articles ? Si oui comment peut-on les interpréter : registre explicatif mobilisé, nature des difficultés, mise en jeu d'obstacles ?
QR1e. L'étude de la littérature scientifique primaire donne accès à certaines facettes de l'activité scientifique. Quelle image de la nature de la science mobilisent les étudiants lors de l'analyse des articles scientifiques ?

Tableau 26 : questions de recherche relevant du pôle 1 (recherches de significations)

2.2. Recherche de faisabilités : évaluation de certains choix didactiques et détermination de possibles didactiques

Certains choix de l'expérimentation sont analysés en vue de déterminer certains possibles didactiques et d'en identifier les limites. Ce second pôle de questions de recherches est mineur dans notre thèse puisque notre objectif principal est, avant tout, de comprendre le raisonnement des étudiants (pôle 1). Le tableau 27 présente les questions relevant du pôle 2 (recherches de faisabilités).

QR2a. La présentation croisée des articles associée au débat interne à chaque groupe de travail permet-elle l'engagement des étudiants dans le débat collectif pour les deux articles non lus ?
QR2b. Quelle est la pertinence du choix des articles proposés aux étudiants dans le but de travailler la dualité fonctionnelle et évolutive des classifications et l'évolution des idées relative au groupe des végétaux ? Des documents d'accompagnement des articles apparaissent-ils comme nécessaire dans le contexte de la situation analysée ?
QR2c. Quelle est la faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais avec l'accompagnement proposé ?

Tableau 27 : questions de recherche relevant du pôle 2 (recherches de faisabilités)

2.3. Recherche méthodologique : la réalisation de carte conceptuelle comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation

Sur le plan méthodologique, nous souhaitons étudier les potentialités et les limites de la réalisation de cartes conceptuelles pour comprendre le raisonnement des étudiants, d'une part, et le processus de problématisation, d'autre part.

2.3.1. Les cartes conceptuelles comme outil de recherche sur le raisonnement

Le troisième pôle de questions a pour objectif d'examiner les conditions de possibilité dans lesquelles la réalisation de cartes conceptuelles pourrait constituer un outil de recherche didactique au service de l'étude du raisonnement scientifique. Les cartes conceptuelles sont des productions particulières au sens où la part d'implicite est assez grande en raison de leur caractère relativement schématique (ensemble de mots interconnectés formant des propositions). Utiliser cet outil pour étudier le raisonnement des concepteurs de la carte suppose de faire l'hypothèse que « le choix des mots utilisés pour qualifier les concepts est cohérent avec la définition conceptuelle de l'élève » et que « l'explicitation des liens d'une carte traduit une partie de la théorie explicative de l'élève » (Tribollet *et al.*, 2000, p. 63).

C. Orange et D. Orange-Ravachol (2013, p. 51) rappellent que l'étude des modèles explicatifs des apprenants implique un travail d'inférence à partir de productions en prenant en compte « les conditions de réalisation des productions » qui ne sont pas des « traductions transparentes de construction mentales préalables ». Notre recherche propose donc d'étudier une question de nature méthodologique visant à contrôler au maximum le nécessaire travail d'inférence du chercheur à partir d'une carte conceptuelle permettant d'examiner le raisonnement des étudiants. La carte réalisée (autrement dit la production finale) reflète-t-elle « fidèlement » la réflexion mise en œuvre par les étudiants lors de sa construction ? S'il existe des écarts entre la production finale et l'argumentation développée pendant la construction, comment les interpréter ? Quelles sont les potentialités de cet outil de recherche et quelles sont les limites de l'étude de cartes sans une analyse de leur construction ?

2.3.2. Les cartes conceptuelles comme outil de recherche sur la problématisation

Cette recherche s'ancre dans le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation dans lequel le débat est l'outil privilégié. Nous tentons de déterminer dans quelle mesure les cartes conceptuelles peuvent être utilisées dans l'analyse de la construction de problèmes par les étudiants. La carte donne à considérer un ensemble de propositions reliées entre elles. Mais le sens des propositions doit s'envisager en relation avec les questions travaillées, comme nous l'explique M. Fabre.

> « On ne peut pourtant interpréter une proposition comme « Napoléon a été vaincu à Waterloo » sans savoir si elle répond à la question « Qui a été vaincu à Waterloo ? » ou plutôt à celle de savoir si les despotes sont toujours vainqueurs ? La proposition n'a pas son sens en elle-même et renvoie toujours à une question, fut-elle implicite ou cachée. La notion de problème est donc ici étroitement liée à celle de contexte. » (Fabre, 2009, p. 27)

Dans quelle mesure les cartes conceptuelles peuvent-elles être utilisées pour analyser la construction de problèmes par les étudiants ? La problématisation étant un processus dynamique, nous considérons que nous ne pouvons pas nous limiter à l'analyse de la seule production finale mais que c'est l'étude de sa construction qu'il convient de mener. Construire un problème implique un double dédoublement entre faits et idées, d'une part, et entre contraintes et nécessités, d'autre part. L'étude de l'activité de construction de la carte permet-elle de caractériser ce double dédoublement ?

Le tableau 28 récapitule les questions relevant du pôle 3 (recherche méthodologique).

QR3a. La carte réalisée (autrement dit la production finale) reflète-t-elle « fidèlement » le raisonnement mis en œuvre par les étudiants lors de sa construction ? S'il existe des écarts entre la production finale et l'argumentation développée pendant la construction, comment les interpréter ? Autrement dit, quelles sont les potentialités de cet outil de recherche mais également quelles sont les limites de l'étude de cartes sans analyser leur construction ?
QR3b. Dans quelles mesures les cartes conceptuelles peuvent-elles être utilisées pour analyser la construction de problèmes par les étudiants ? L'étude de l'activité de construction de la carte permet-elle de caractériser le double dédoublement caractérisant le processus de problématisation (entre faits et idées d'une part et entre contraintes et nécessités d'autre part) ?

Tableau 28 : questions de recherche relevant du pôle 3 (recherche méthodologique) sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche didactique

Présentons à présent la séquence qui fonde notre reconstruction didactique en explicitant les raisons des principaux choix didactiques.

3. Présentation de la reconstruction didactique et justification des choix

3.1. Choix des articles

Afin de construire la polysémie du concept de végétal et sa relation avec les différents types de classifications, nous choisissons des articles de deux types très différents. Le premier se situe dans le champ de l'écologie où la classification fonctionnelle est présente mais implicite. Le second type d'articles porte sur la systématique des Eucaryotes et permet d'envisager l'évolution historique du groupe des végétaux. La classification y est explicite puisqu'elle constitue l'objet de ces articles.

3.1.1. Article d'écologie et classification fonctionnelle

L'objectif de l'analyse d'un article d'écologie vise à faire comprendre que les différents modes de nutrition permettent d'établir plusieurs groupes d'organismes en fonction de la place qu'ils occupent dans les réseaux trophiques et donc dans les cycles de la matière. Construire un cycle biogéochimique implique d'élaborer une classification fonctionnelle, qui constitue un outil pour penser les transferts d'un réservoir à un autre selon les processus biochimiques impliqués. C'est donc un article portant sur le cycle biogéochimique du carbone qui est l'objet de notre choix[157]. Comme l'enjeu se situe dans la mise en relation d'un cycle

[157] Sabine, C. L. (2014). Global carbon cycle. In *Encyclopedy of Life Sciences (eLS).* Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470015902.a0003489.pub

écologique avec une classification fonctionnelle et des conséquences sur la conception des végétaux, seul un paragraphe de l'article est sélectionné comprenant un schéma fonctionnel sur lequel les flux de carbone sont représentés entre les différents réservoirs (cf. figure 61). Les parties de l'article développant le cycle du carbone pour lui-même ne seront pas données à travailler aux étudiants pour centrer l'analyse sur notre thème d'intérêt. La figure permet d'identifier le rôle des végétaux au niveau océanique ou continental, identifiable par la légende NPP (Net Primary Production), c'est-à-dire la production primaire nette. La citation ci-après permet de comprendre que la photosynthèse est la ressemblance fonctionnelle conduisant au regroupement des organismes assurant une même fonction dans le cycle du carbone : « CO_2 is removed from the atmosphere and turned into plant material through photosynthesis » (Sabine, 2014, p. 1).

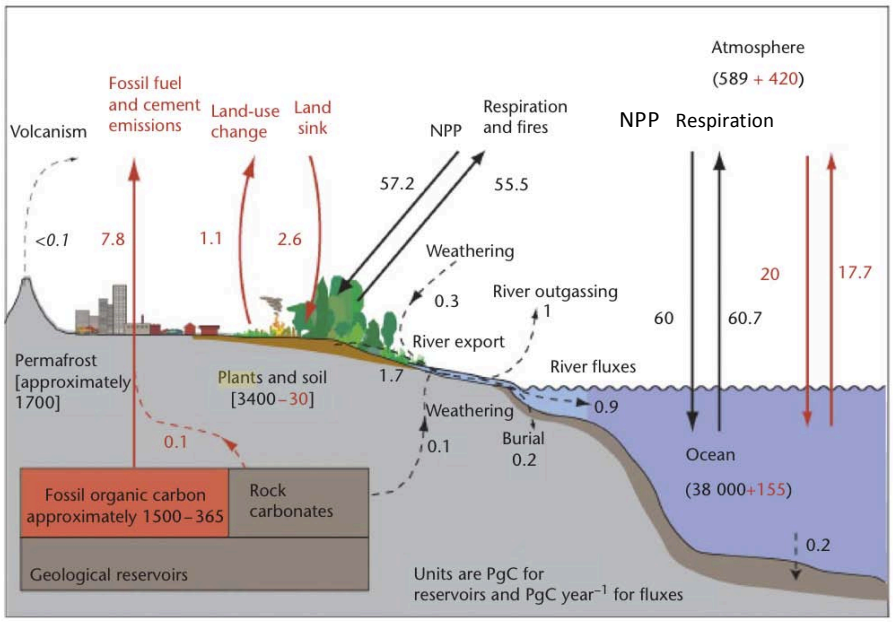


Figure 6 Schematic of global carbon cycle. Black arrows represent preindustrial fluxes (in petagrams of carbon per year) and red arrows represent average anthropogenic fluxes for 2000–2009. Values in brackets represent estimated reservoir sizes (in petagrams of carbon). Adapted from Sabine *et al.* (2004a).
© Island Press.

Figure 61 : schéma du cycle de carbone, extrait de Sabine (2014, p. 7). Les légendes « NPP » (Net Primary Production) et « Respiration » ont été ajoutées au dessus des flèches noires du compartiment océanique, par souci d'homogénéité avec les flèches noires du compartiment continental afin de localiser facilement le flux de carbone lié au métabolisme

Cependant, afin d'expliciter d'avantage la diversité des organismes regroupés au sein des végétaux dans une conception fonctionnelle, nous pensons intéressant d'ajouter un second extrait d'article développant cet aspect, sachant que l'article de Sabine (2014) ne présente pas les organismes inclus dans le groupe nommé végétaux. L'article sur le plancton de

l'Encyclopédie Universalis[158] mobilise la dichotomie entre animaux et végétaux en distinguant zooplancton et phytoplancton. Le critère qui permet l'élaboration de ces deux groupes est fonctionnel : « le mode de vie ». La fraction végétale du plancton est regroupée selon la photosynthèse. Les cyanobactéries sont indiquées comme explicitement végétales dans l'extrait ci-dessous, donné pour analyse aux étudiants. Rappelons que ces bactéries photosynthétiques permettent de différencier la conception fonctionnelle de la conception cellulaire et fonctionnelle des végétaux.

> « Habituellement connu en tant que nourriture des baleines**, le plancton constitue en réalité un vaste ensemble d'organismes (animaux et végétaux)**, souvent microscopiques, qui se développent dans tous les milieux aquatiques : du plus petit des étangs jusqu'au plus profond des océans. (…) Les milliers d'espèces qui composent le plancton sont généralement classées en catégories, en fonction de leur taille (fig. 1), **de leur mode de vie** ou de leur habitat. Parmi ces catégories, **le phytoplancton désigne le plancton végétal. Capable de photosynthèse, il est principalement composé d'algues unicellulaires et de cyanobactéries (bactéries particulières autrefois appelées algues bleues).** Il s'agit donc majoritairement de microbes mesurant pour la plupart moins de 0,2 mm. Parmi les algues unicellulaires, on trouve en particulier une grande diversité de diatomées, reconnaissables à leur squelette externe siliceux (le frustule), ainsi que des flagellés chlorophylliens aux formes parfois improbables. Le zooplancton représente la fraction animale du plancton. On y trouve la quasi-totalité des groupes connus. » (Gasparini, 2014), *c'est nous qui soulignons*.

Ainsi ce n'est pas un unique article d'écologie qui est donné à analyser aux étudiants mais deux extraits issus de deux articles complémentaires, constituant un texte de deux pages.

3.1.2. Articles portant sur la systématique des Eucaryotes et classification phylogénétique

Afin de travailler la rectification du groupe des végétaux dans la systématique des Eucaryotes, nous avons décidé de sélectionner trois articles majeurs du XX^{e} siècle afin de permettre aux étudiants de construire les raisons de l'évolution du groupe des végétaux par l'analyse des problèmes auxquels se sont attaqués plusieurs systématiciens ainsi que le type de caractères étudiés et de méthode classificatoire. Le nombre de trois articles fut déterminé pour des raisons pratiques de durée de la séquence et pour des raisons scientifique et didactique que nous allons présenter dès à présent.

Les trois articles extraits de l'étude historique sont ceux de Whittaker (1969), Cavalier-Smith (1981) et Burki (2014). Ils balaient quarante-cinq ans de systématique (1969-2014). Même si

[158] Gasparini, S. (consulté en août 2014). Plancton. *Encyclopaedia universalis [en ligne]*. Disponible sur le site http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/plancton

des références aux classifications plus anciennes sont présentes dans les articles, il s'agit donc d'une histoire très contemporaine de la systématique qui s'inscrit entièrement dans le paradigme évolutionniste. Nous n'avons pas choisi de travailler des classifications élaborées dans un contexte fixiste, telles que celles de Linné, Bory de Saint Vincent, Owen ou Hogg. En effet, notre objectif réside dans l'importance de la méthode de classification, des techniques et théories mobilisées, de la mise en jeu d'éléments idéologiques (comme le gradisme) au sein d'une même ambition que nous qualifierons de phylogénétique (s.l.)[159] (cf. figure 62).

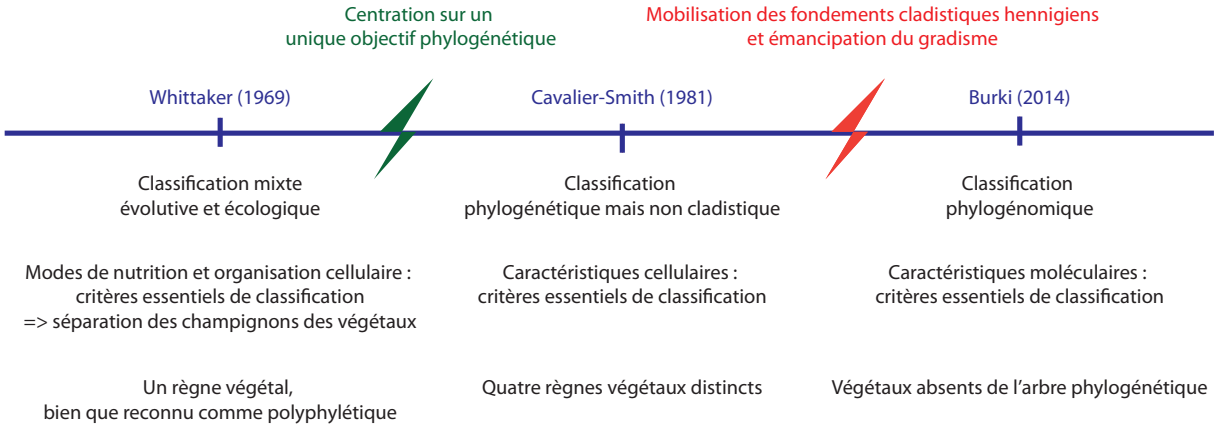


Figure 62 : raisons majeures du choix des trois articles de systématique des Eucaryotes

- **Raisons du choix de l'article de Whittaker (1969)**

La classification construite par R.H. Whittaker nous a semblé incontournable. Sa classification consacre la séparation des champignons des végétaux sur la base du mode de nutrition. Elle laisse des traces encore aujourd'hui, comme en témoigne le recours à la conception fonctionnelle macrocentrée chez 22 étudiants.

Nous avions initialement choisi l'article de 1957 de Whittaker qui présente l'avantage d'être court (deux pages) et d'exposer de façon très claire sa double ambition évolutive et écologique. Mais nous avons finalement retenu l'article de 1969 car l'argumentation y est bien plus développée, ce qui permet aux étudiants d'analyser la justification des choix de classification de l'auteur.

Cet article est intéressant du point de vue de l'analyse argumentative car il comprend une longue partie initiale où l'auteur compare et critique les classifications antérieures, facilitant le repérage des controverses par les étudiants. Une section finale discute des limites de la

[159] L'étude historique a montré que Whittaker a une ambition évolutive mais ne construit pas une classification phylogénétique, acceptant des groupes polyphylétiques. Cavalier-Smith et Burki se distinguent sur un plan théorique par le recours aux fondements hennigiens pour le second.

classification proposée et permet de comprendre que l'auteur a conscience de la polyphylie des groupes proposés. Les étudiants peuvent ainsi identifier le caractère éclectique de ce système à cinq règnes.

Enfin, contrairement à l'article de 1957, cet article comporte une représentation graphique de la classification (cf. figure 41, p. 196) qui permet une comparaison avec les arbres des deux autres articles de systématique des Eucaryotes.

- **Raisons du choix de l'article de Cavalier-Smith (1981)**

Nous retenons l'article de T. Cavalier-Smith de 1981, qui donne lieu à l'éclatement du règne végétal. Unique jusque-là, le règne végétal est scindé en quatre règnes indépendants dans ce système comportant cinq règnes eucaryotiques, que l'auteur propose de regrouper en cinq ou sept règnes dans une section finale de l'article.

Cet article présente l'intérêt de se positionner par rapport aux classifications antérieures, en particulier le système à cinq-règnes de Whittaker, mettant en relief une controverse intéressante à douze ans d'intervalle. Pour le travail didactique qui est le nôtre, un des aspects fondamentaux est la position théorique de Cavalier-Smith que l'on peut rattacher à la systématique évolutionniste. Ainsi la comparaison de l'article de T. Cavalier-Smith avec celui de F. Burki (2014) permet d'analyser l'impact de la cladistique sur la classification phylogénétique.

Cet article comporte trois représentations graphiques de phylogénie des Eucaryotes que l'auteur discute (cf. figure 44, p. 208), mais sans soumettre à une analyse cladistique. La position des groupes actuels en position intermédiaire et la représentation des relations phylogénétiques par des flèches sont des indicateurs de sa conception gradiste et non cladiste, qui nous semblent importants à travailler dans le cadre de notre reconstruction didactique.

- **Raisons du choix de l'article de Burki (2014)**

Le choix du dernier article s'est porté sur celui de F. Burki (2014). L'intégration d'un article récent dans notre reconstruction didactique permet de comparer une classification actuelle avec celles établies trente ans plus tôt par T. Cavalier-Smith. Cette comparaison devrait permettre de caractériser de nouvelles conditions de possibilités théoriques et techniques de l'évolution de la classification.

Le parti-pris de choisir cet article se justifie notamment par sa partie introductive claire qui permet, là encore, de le positionner par rapport aux précédentes classifications. De plus, l'auteur explicite la révolution moléculaire ainsi que la méthodologie phylogénomique

utilisée, permettant de relier l'évolution de la classification à l'évolution des techniques et des théories en biologie.

De plus, l'arbre phylogénétique (cf. figure 54, p. 228) est intéressant pour l'analyse didactique, car il diffère très fortement des arbres des deux autres articles par sa forme circulaire, attestant d'une volonté manifeste de rupture avec la pensée gradiste.

3.1.3. Bilan sur le choix des différents articles

Le tableau 29 récapitule les raisons du choix des articles retenus en précisant le type de classification engagée, les éléments importants de l'article et ce que sont les végétaux dans chaque système classificatoire.

	Type de classification	**Éléments importants**	**Que sont les végétaux ?**
Article écologie Sabine (2014) et Gasparini (2014) (2 pages)	Classification fonctionnelle de type écologique	• Derrière la modélisation du cycle biogéochimique du carbone correspond une classification fonctionnelle • Le groupe fonctionnel des végétaux inclue des organismes de structures cellulaires variées dont des cyanobactéries	Tous les organismes photosynthétiques
Whittaker (1969) (8 pages à lire)	Classification mixte, éclectique (évolutive, écologique et niveaux d'organisation)	• Décalage entre une ambition évolutive et des compromis pour mettre en avant d'autres critères fonctionnels jugés essentiels • Méthodologie de construction de l'arbre non rigoureuse. Usage de l'homologie ponctuel • Éléments de controverse scientifique (notamment la classification traditionnelle à deux règnes et le système de Copeland avec la critique des Protoctista et de la place des champignons)	Règne Plantae : organismes multicellulaires photosynthétiques Groupe polyphylétique (alliance de groupes séparés) réunis par une même "direction" évolutive

Cavalier Smith (1981) (13 pages à lire)	Classification phylogénétique mais pas cladistique	• Critique explicite de Whittaker (controverse très saillante) =>attachement à des groupes monophylétiques au sens large (pas au sens d'Hennig) incluant la paraphylie • Critères cellulaires et biochimiques Mise en avant de l'importance technique du microscope électronique. Ouverture sur l'importance des données moléculaires à venir => permet de travailler les conditions de possibilité techniques de l'évolution de la classification • Polyphylie des végétaux en lien avec de multiples endosymbioses => permet de travailler les conditions de possibilité théoriques d'évolution de la classification • Méthodologie : homologies supposées mais non testées	Végétaux séparés en 4 groupes monophylétiques (« *Four separate plant kingdoms* ») : Viridiplantae; Biliphyta (tous deux rassemblés en Plantae); Cryptophyta; Chromophyta (tous deux rassemblés en Chromista) => classification avec plusieurs règnes "végétaux"
Burki (2014) (8 pages à lire)	Classification phylogénétique de type phylogénomique	• Méthodologie utilisant de très nombreux caractères (phylogénomique) et des fondements cladistiques (indiqué par des termes comme « synapomorphy ») => permet de travailler les conditions de possibilité techniques et théoriques d'évolution de la classification • Multiples endosymbioses et polyphylie des eucaryotes photosynthétiques • Éclatement des protistes et des végétaux des anciennes classifications • Irrésolution de plusieurs groupes • Plus d'approche gradiste, émancipation de cette idéologie	Les végétaux n'apparaissent pas pas dans l'arbre phylogénétique proposé. Ils ne sont évoqués que dans la partie initiale de critique des anciennes classifications.

Tableau 29 : comparaison des quatre articles choisis

Afin de ne pas dénaturer les articles scientifiques, nous avons fourni aux étudiants l'intégralité des trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes, en plus des deux extraits des articles d'écologie. Cependant, pour de pas imposer un trop lourd travail de lecture des textes écrit en anglais, dans le contexte d'une année de préparation d'un concours (CAPES SVT), certains paragraphes jugés hors-sujet par rapport à notre problématique ont été indiqués. La longueur des articles à lire était donc de huit pages pour l'article de Whittaker, treize pages pour celui de Cavalier-Smith, huit pages pour celui de Burki et enfin de deux pages pour les extraits de Gasparini et Sabine (écologie).

3.2. La reconstruction didactique

La reconstruction didactique est constituée de plusieurs séances. Présentons donc tout d'abord sa place dans la formation des étudiants de master 1 avant d'envisager la présentation des différentes séances.

3.2.1. Place dans la formation des étudiants

La reconstruction didactique prend place après un cycle d'enseignement sur le thème de la classification phylogénétique (6h de CM et 8h de TD), ce sujet étant au programme du CAPES que préparent les étudiants de M1 MEEF parcours SVT. La position tardive de la séquence dans le thème « Classification » est nécessaire afin de permettre aux étudiants de remobiliser les principes et méthodes de la classification phylogénétique dans le contexte de la situation-problème qui est la nôtre. Lors d'un TD précédent, les étudiants ont dégagé la polyphylie des eucaryotes photosynthétiques en lien avec l'apparition multiple des plastes, à partir d'une étude documentaire. Pour plus de cohérence, le professeur de biologie qui a assuré ces enseignements mettra en œuvre la reconstruction didactique, qui n'apparaît donc pas déconnectée du thème aux yeux des étudiants.

De plus, ces étudiants ont eu en amont des enseignements d'épistémologie et d'histoire des sciences dans une unité d'enseignement de 3 crédits ECTS (24h) où ils analysèrent des textes historiques écrits par des auteurs majeurs (dont Cuvier et Saint Hilaire) avec une grille différente de la nôtre. Ils sont donc déjà habitués à un travail d'analyse de textes.

Enfin, soulignons aussi que les étudiants bénéficièrent de 10h d'enseignement d'anglais en M1. Ce sont les deux enseignantes de l'UE d'anglais qui mirent en œuvre la séance d'anglais de la reconstruction didactique, prenant place dans un créneau habituel de langues et avec le même type de méthode pédagogique.

Ces différentes conditions sont donc propices à l'installation de notre reconstruction didactique en continuité pédagogique avec les enseignements du master 1 dans lequel elle s'inscrit.

3.2.2. Programmation des différentes séances et présentation des différentes tâches

Le tableau 30 présente la programmation des cinq séances constituant la séquence de notre reconstruction didactique.

Date	Séance	Remarques
Mardi 25/11/2014 (30 min)	Séance de passation du questionnaire	Même questionnaire que pour l'enquête initiale
Mercredi 03/12/2014 (2h)	Séance d'anglais sur certains extraits des trois articles	Séance en classe entière (n=30) Répartition des articles en fin de séance et formulation de la consigne qui est également envoyée par mail aux étudiants
Mercredi 03/12/2014 (3h)	Travail d'analyse des articles par binôme (en autonomie)	Le professeur est présent pour répondre aux éventuelles questions de compréhension de l'anglais. Envoi par mail des grilles remplies par chaque binôme au formateur pour vendredi 05/12/2014
Lundi 08/12/2014 (4h)	Séance de biologie avec plusieurs phases	Séance en demi-groupe (n=15) permettant l'organisation de débats scientifiques
Mercredi 10/12/2014 (2h)	Séance de réalisation d'une carte conceptuelle	Séance en demi-groupe (n=15) Travail par binôme en autonomie

Tableau 30 : programmation des différentes séances

La séquence débute par la passation du questionnaire sur les végétaux (cf. chapitre 2), utilisé lors de la première enquête à l'échelle nationale (tâche 1). Cette première tâche permet de motiver la séquence et de favoriser l'entrée en questionnement des étudiants. L'analyse du questionnaire a pour objectif de situer chaque étudiant sur un plan de la conception mobilisée. La séance d'anglais permet de faciliter le travail de lecture des articles (tâche 2). À la fin de cette séance, les articles sont répartis entre les étudiants travaillant en dyade. Chaque binôme doit analyser les deux extraits d'écologie (classification fonctionnelle) et un des trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes (classification phylogénétique s.l.). En effet, lire et analyser tous les articles représenterait un travail trop important dans le contexte d'une année de préparation d'un concours. Cette analyse de deux textes en autonomie correspond à la tâche 3. La consigne suivante est donnée aux étudiants et leur permet de positionner le problème :

> « Dans le questionnaire que vous avez rempli il y a quelques jours, certains d'entre vous ont répondu que la diatomée et l'euglène sont des espèces végétales. D'autres n'étaient pas de cet avis. D'autres encore ne se sont pas prononcés. Vous n'avez pas défini les végétaux de la même manière.

> À partir des articles scientifiques et des documents proposés, montrer qu'il n'existe pas une unique manière de répondre à cette question. Caractériser les différentes conceptions des végétaux selon les problèmes travaillés. De plus, la place de ces espèces au sein des classifications du vivant a changé au cours du 19e et 20e siècle avec l'évolution historique des classifications. Vous présenterez comment a évolué le groupe des végétaux dans les différentes classifications biologiques et expliquerez ces changements. Vous justifierez vos propos en citant des extraits des textes proposés afin de pouvoir discuter de votre position lors de la séance.
>
> Utilisez la grille d'analyse qui vous est proposée pour cadrer votre lecture des deux textes. Ne cherchez pas à comprendre tous les groupes systématiques présentés et caractères utilisés, mais concentrez vous sur la logique argumentative. Ce travail est à réaliser en binôme. Envoyez nous la grille remplie par mail avant la séance. Les textes (en pdf) et la grille (excel) sont téléchargeables sur l'espace numérique de travail pour faciliter les copier-coller. Vous devrez présenter oralement votre analyse au groupe lors de la prochaine séance de TD de biologie afin de mettre en commun vos idées sur les différents articles étudiés. »

La séance de TD de biologie (de 4h) est centrale dans la reconstruction didactique. Elle est présentée en détail en annexe (cf. p. 547). Elle débute par une phase en petit groupe de travail (tâche 4) associant des étudiants ayant lu des articles différents, de manière à mettre en commun leur analyse ce qui permettra ensuite de s'engager dans un débat collectif, divisé en deux phases. La première phase (tâche 5) concerne les quatre articles afin de travailler la dualité de classification : fonctionnelle et phylogénétique, puis la seconde phase (tâche 6) laisse de côté la classification fonctionnelle pour se focaliser sur les trois articles de systématique des Eucaryotes afin de travailler les raisons de l'évolution du groupe des végétaux au sein de la classification phylogénétique. La tâche 7 consiste en la création d'une carte conceptuelle par binôme et permet de réaliser un bilan de la séquence.

Certains choix didactiques ont été pensés pour accompagner le travail des étudiants face à des articles de recherche complexes, en anglais et relativement longs :

- Une séance d'anglais initiale pour accompagner l'entrée dans les articles
- La présence du professeur pendant le travail autonome de lecture et d'analyse des articles afin de répondre à d'éventuelles questions de compréhension linguistique
- Une tâche d'analyse réalisée par binôme pour faciliter l'entraide et permettre un travail collaboratif
- Des coupures dans les articles pour centrer l'analyse sur les parties essentielles au regard de la situation-problème et une consigne qui appelle chacun à se concentrer sur la logique argumentative et à ne pas chercher à comprendre tous les groupes

systématiques présentés, inconnus des étudiants pour nombre d'entre-eux et les caractères utilisés, dont certains sont complexes

- Une grille d'analyse pour aider les étudiants à se focaliser sur les aspects essentiels au regard de la situation-problème.

Le tableau 31 présente le scénario de la séquence décomposé en différentes tâches.

Scénario de la séquence

« Les végétaux dans les classifications biologiques : pluralité des conceptions et évolution historique des idées »

Tâche	Buts	Contraintes (ce que la tâche oblige à faire)	Critères de réussite	Modalités
1. Questionnaire sur les végétaux	Engager la réflexion sur le concept des végétaux en tant que groupe biologique	Répondre au questionnaire oblige les étudiants à définir les végétaux en référence à plusieurs problèmes : problème ouvert, problème phylogénétique, problème écologique. Il implique de questionner certains caractères physiologiques et cellulaires et la place de certaines espèces problématiques (unicellulaires, orobanche).	Il n'y a pas une unique réponse possible. L'objectif est d'initier un premier déplacement par une entrée en questionnement.	Pré-test individuel réalisé la semaine qui précède la séquence d'enseignement Durée : environ 30 minutes.
2. Comprendre l'expression anglaise des trois articles de systématique (séance d'anglais)	Faciliter l'entrée dans la lecture des articles. Aide à la compréhension des textes en anglais, afin que cela ne constitue pas un blocage pour le cœur du travail.	Cette séance oblige les étudiants à entrer dans la lecture des trois articles en anglais à travers plusieurs tâches (exercices) : analyser les arbres et légendes de Burki et Whittaker, identifier les arguments pour et contre chaque système classificatoire (analyse de controverse)	Réussite si la lecture de l'article par binôme (qui suivra la séance d'anglais) ne pose pas de problèmes majeurs au niveau de la compréhension de l'anglais	Travail piloté par les deux enseignantes d'anglais du M1. Durée de la séance : 2h Répartition des 3 articles à lire à l'issue de cette séance.

Tâche	**Buts**	**Contraintes (ce que la tâche oblige à faire)**	**Critères de réussite**	**Modalités**
3. Analyse de deux articles avec une grille d'analyse (un article de systématique des Eucaryotes sur les trois analysés et les deux extraits d'écologie)	• Construire la dualité de problèmes scientifiques auxquels le groupe de végétaux est lié : problème fonctionnel écologique et problème phylogénétique • Analyse des raisons qui fondent un système classificatoire des Eucaryotes et identification de la nature systématique des végétaux dans cette classification	L'analyse de deux articles avec une grille focalise sur certains aspects essentiels au regard de la situation-problème, notamment le type de problème et de caractères étudiés, la méthode de classification, l'usage de l'homologie, les éléments de controverse scientifique. Analyse de l'argumentation de chaque auteur.	Réussite de la tâche si la grille est remplie et si elle peut être présentée oralement au groupe lors de la séance suivante.	Travail en dyade en autonomie. Le professeur est disponible et répond uniquement aux questions de compréhension posées par la langue anglaise des articles. La grille remplie est envoyée par mail à l'enseignant et au chercheur. Durée : environ 3h
4. Présentation croisée des articles et de la grille et débat interne à chaque groupe de travail	Présenter les articles lus par chaque membre du groupe et questionner les collègues afin de produire une synthèse personnelle (sous forme d'un tableau synthétique)	Obliger les étudiants qui ont lu un article à le présenter de manière claire et argumentée pour répondre à la situation-problème. Obliger les étudiants n'ayant pas lu un article à questionner ses collègues pour en comprendre la logique	Réussite si les échanges permettent à chacun de remplir le tableau synthétique de comparaison des quatre articles	Groupes mixtes de 4 à 6 étudiants, rassemblant des étudiants ayant lu des articles différents. Durée : 1h15 (environ 15 min d'échange par article puis 15min de synthèse individuelle avec un tableau à remplir). L'enseignant n'intervient pas mais répond à des questions de compréhension.

Tâche	**Buts**	**Contraintes (ce que la tâche oblige à faire)**	**Critères de réussite**	**Modalités**
5. Débat collectif sur les quatre articles et élaboration d'un tableau commun	Élaborer un tableau de comparaison des quatre articles permettant de répondre à la situation-problème	Le débat entre les trois groupes ayant réalisé la même tâche en parallèle oblige les étudiants à argumenter, comprendre les arguments des autres groupes et se positionner en validant, complétant ou s'opposant.	Réussite si le débat permet d'identifier les points d'accord et d'éventuelles questions en suspens non résolues (éventuellement travaillées dans la tâche suivante)	Le professeur anime le débat collectif. Il incite les échanges, la reformulation, permet l'expression d'avis discordants. Durée : 1h15
6. Bilan sur l'évolution des idées au niveau des trois articles de systématique et second débat collectif pour élaborer un tableau	Identifier les raisons du changement de la systématique des Eucaryotes entre les trois auteurs étudiés.	Oblige à faire une synthèse des ruptures majeures au niveau systématique, des conditions de possibilités techniques et théoriques de l'évolution des idées ainsi que la mise en jeu de valeurs et d'idéologies dans les classifications biologiques. Accéder à la dimension construite, provisoire des groupes systématiques comme tout concept scientifique.	Réussite si les tableaux réalisés sont remplis et peuvent être présentés, défendus lors de la phase de mise en commun.	Découpée en deux temps : 30min de travail de groupe pour remplir une nouvelle grille (les mêmes groupes qu'en début de séance) puis 30 min de mise en commun collective. Durée : 1h

Tâche	Buts	Contraintes (ce que la tâche oblige à faire)	Critères de réussite	Modalités
7. Réalisation d'une carte conceptuelle faisant le bilan des séances précédentes	Réaliser une carte conceptuelle des végétaux : - faisant le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique - et expliquant comment et pourquoi ont évolué ces conceptions.	• Réaliser cette carte oblige à construire une argumentation remobilisant les séances précédentes. La carte est un réseau conceptuel structuré. Sa construction implique de prendre du recul pour réaliser une synthèse. • La consigne comprend un pluriel imposant de caractériser la pluralité des conceptions des végétaux. La consigne engage également une explicitation des raisons de l'évolution des idées.	La tâche est réussie si la carte conceptuelle intègre : • La double dimension scientifique du concept : fonctionnelle et phylogénétique • Éventuellement la dimension de sens commun • Les raisons de l'évolution des idées relatives à la systématique • Les conditions de possibilité d'évolution de la classification : techniques et théoriques • La mise en jeu de valeurs telles que le gradisme	Durée de la séance : 2h - 30 minutes de présentation (carte conceptuelle, fonctionnement du logiciel CmapTools, consigne) - 15 min : travail individuel sur papier - 1h15 : réalisation de la carte par binôme

Tableau 31 : scénario de la séquence de la reconstruction didactique

3.2.3. Accompagnement du travail d'analyse

Pour accompagner l'analyse des articles et faciliter le travail de problématisation des étudiants, deux types d'accompagnement sont envisagés et seront présentés successivement : des grilles d'analyse et une frise chronologique.

- **Grilles d'analyse d'articles**

➢ **Première grille de lecture des deux articles par binôme**

L'exploitation didactique de la littérature scientifique primaire a donné lieu à l'élaboration de grilles d'analyse par différents chercheurs. Koeneman, Goedhart & Ossevoort (2013) donnèrent à des lycéens à travailler des articles scientifiques afin d'étudier la façon dont les scientifiques construisent leur argumentation. Leur grille distingue sept éléments : la motivation de la recherche, l'objectif, la conclusion principale, les conséquences, les arguments justifiant la conclusion, les contre-arguments, c'est-à-dire une autocritique des conclusions, la réfutation de ces contre-arguments.

Cependant, cette grille d'analyse reste très générique et ne nous semble pas adaptée à notre propre objectif de recherche. Nous pensons qu'il est nécessaire de faire apparaître plus explicitement le problème qui fonde la classification biologique et plus particulièrement le problème de la définition des végétaux au sein d'un système classificatoire donné. Les items de la grille d'analyse se doivent d'être plus spécifiques et prendre en compte les résultats de notre enquête nationale fondée sur le questionnaire. Les étudiants ont rencontré des difficultés concernant les Eucaryotes unicellulaires. Nous proposons donc de porter l'attention sur deux espèces qui serviront de « fil rouge », sachant qu'elles appartiennent ou non aux végétaux selon les systèmes classificatoires. Nous pensons que ces espèces pourraient aider les étudiants à percevoir l'évolution du groupe des végétaux et les principales raisons pour lesquelles ces espèces ont changé de position systématique. Un des moyens d'identification des raisons de l'évolution des systèmes classificatoires est de porter le regard sur les controverses scientifiques. Par ailleurs, l'usage de l'homologie offre l'occasion de distinguer les classifications biologiques. Il nous semble donc intéressant de l'intégrer dans la grille analyse.

La grille d'analyse élaborée comprend les huit items suivants :

- Objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés
- Que sont les végétaux dans la classification ?

- Euglène végétale dans la classification ?
- Diatomée végétale dans la classification ?
- Opposition à des classifications antérieures (éléments de controverse scientifique)
- Justifications des choix de classification
- Usage de l'homologie dans la classification
- Méthodologie : quelle méthode est utilisée pour construire la classification ?

Pour chaque item, les étudiants doivent justifier leur analyse par des citations de l'auteur. Les citations jouent un rôle didactique essentiel puisqu'elles permettent l'étude fine de l'argumentation sans dénaturer les propos du scientifique. Cela devrait également soutenir l'échange entre étudiants durant le travail de groupe. En cas d'interrogation ou de désaccord, le fait d'avoir relevé des citations pourrait permettre aux étudiants d'étayer leurs affirmations et donc de retourner plus rapidement à la source. Nous avons analysé les trois articles de systématique des Eucaryotes avec la grille (cf. annexe, p. 531).

- **Seconde grille à remplir à l'issue du premier travail de groupe**

Une fois réalisée la présentation des quatre articles au sein des petits groupes de travail, chaque étudiant doit récapituler ce qu'il a compris dans la grille ci-après. Cette synthèse a pour but de permettre aux étudiants l'appropriation des articles non lus et de s'engager dans le débat collectif sur ces articles. Pour des raisons pratiques de gestion du temps, elle comprend trois items et non huit :

- Que sont les végétaux dans la classification ?
- Problème(s) au(x)quel(s) la classification répond
- Justifications des choix de classification.

Une dernière ligne permet de consigner les questions que chaque étudiant se pose à l'issue de cette première phase de la mise en commun.

- **Troisième grille focalisant sur la comparaison des trois articles relatifs à la systématique des Eucaryotes**

La dernière phase de la séance de TD de biologie focalise sur les trois articles de systématique pour dégager les raisons de l'évolution des idées en phylogénie. La troisième et dernière grille comprend les quatre items suivants.

- Bilan sur la méthodologie : caractères utilisés et méthode de reconstruction
- Conditions de possibilités techniques
- Conditions de possibilités théoriques

- Idéologie, valeurs sous-jacentes.

Cette grille vise à prendre du recul sur les trois méthodes de classification utilisées, ce qui permet d'identifier les ruptures majeures et de dégager les conditions de possibilité techniques et théoriques des changements de la classification phylogénétique.

Afin de fournir des repères contextuels aux étudiants pour les aider à situer dans le temps les différents systèmes classificatoires, un document d'accompagnement leur est fourni. Nous entendons présenter les choix sous-jacents à l'élaboration de cette frise chronologique.

- **La frise chronologique**

Dans un but de contextualisation temporelle, un document d'accompagnement est distribué aux étudiants en même temps que les articles à analyser (cf. figure 63). Il s'agit d'une double frise chronologique mettant en regard différentes classifications avec des changements importants sur les plans théorique et technique. Chacun des auteurs étudiés est positionné ainsi que trois autres systématiciens cités dans les articles : Linné, Haeckel et Copeland. Comme toute frise, le choix des événements dépend de l'objectif de l'outil. Dans notre cas, furent positionnés des connaissances, des objets, des techniques et des théories en rapport avec les changements au niveau de la systématique. Ce document contribue à orienter l'analyse des étudiants, avec les items de la grille d'analyse qui leur est fournit.

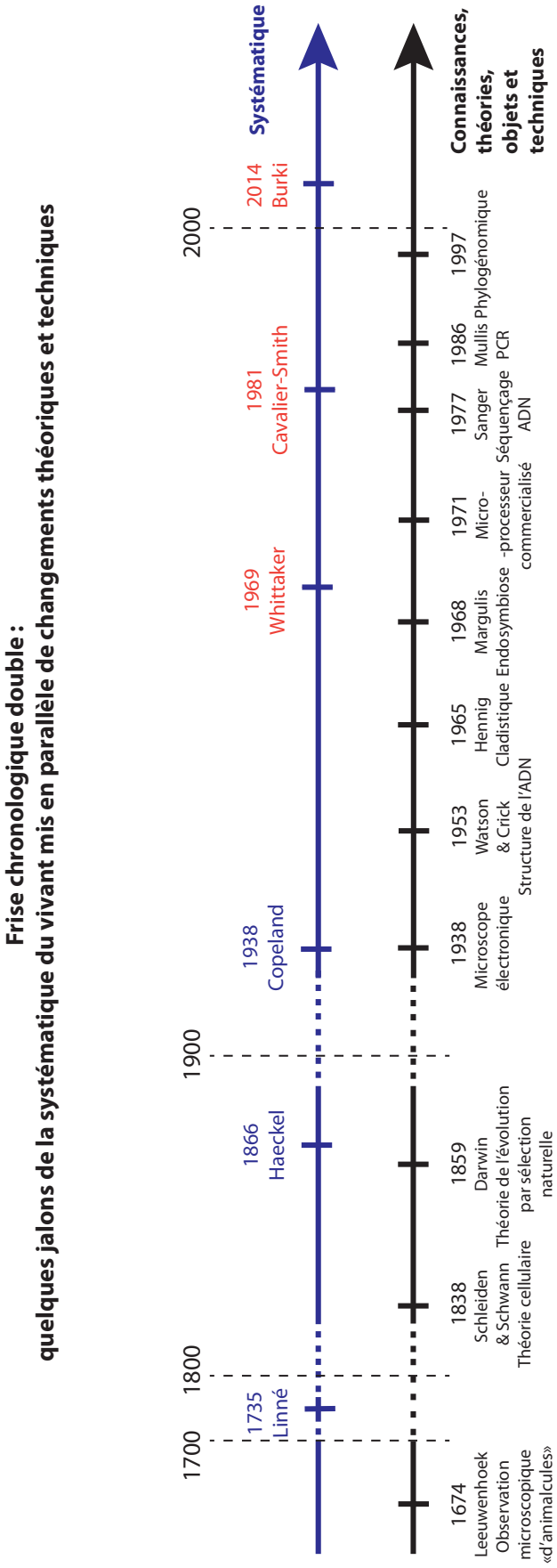


Figure 63 : la frise chronologique fournie en accompagnement des articles

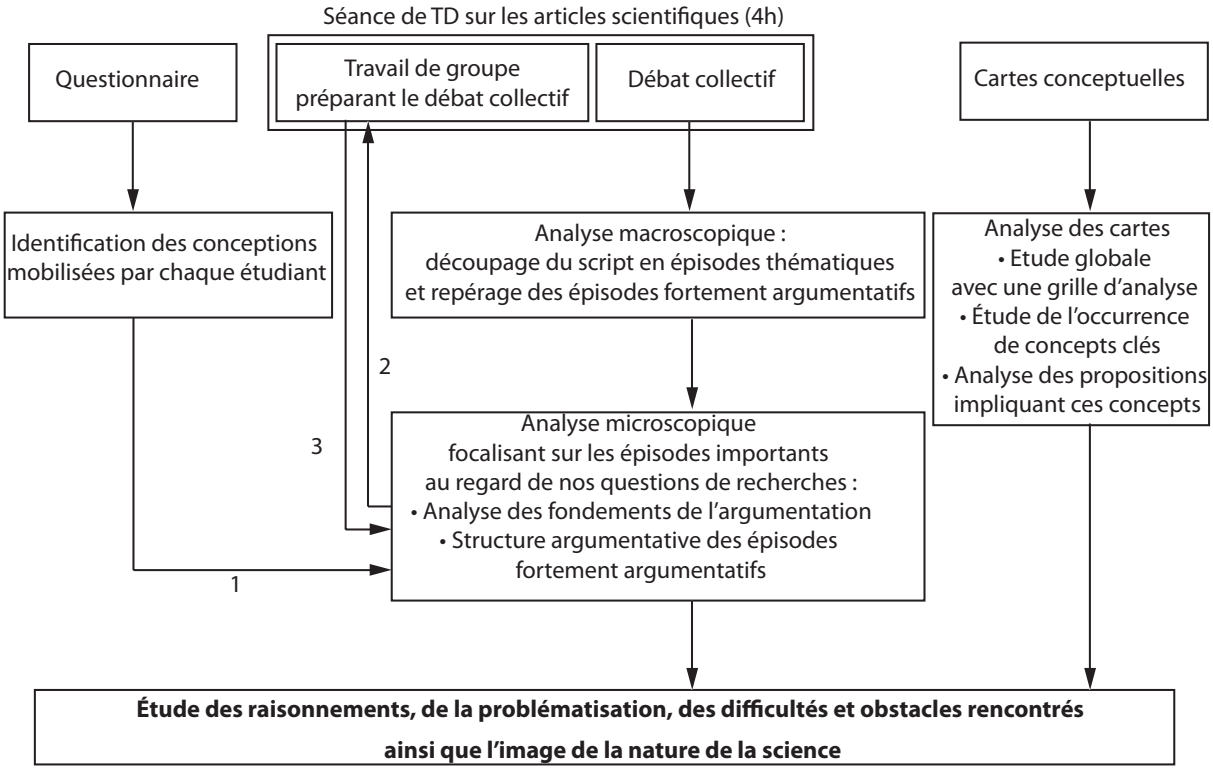
4. Méthodologie d'analyse

4.1. Méthodologie relative aux questions de recherche de significations (QR1)

L'étude des questions relevant du pôle 1 (recherches de significations) correspond à notre préoccupation première. La méthodologie de recherche sera présentée de manière synoptique. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'analyse argumentative du débat collectif avant d'examiner la méthodologie d'analyse des cartes conceptuelles.

4.1.1. Description synoptique de la méthodologie

La figure 64 présente la méthodologie d'analyse des données.



1 : mise en relation des positions prises par des étudiants lors du débat avec leurs réponses au questionnaire initial
2 : repérage de phases du travail de groupe à analyser pour mieux comprendre les épisodes fortement argumentatifs lors du débat collectif
3 : éclairage du débat collectif par l'analyse argumentative de travaux de groupes

Figure 64 : méthodologie correspondant au pôle 1 (recherche de significations)

Les données analysées sont de plusieurs natures. Il s'agit tout d'abord du questionnaire dont l'analyse permet de caractériser les conceptions des étudiants et le type de raisonnement classificatoire avant la séquence. Afin d'éclairer les positions argumentatives de certains étudiants lors du débat collectif, nous avons recours à ces données initiales (étape 1 sur la figure 64). Le corpus majeur de notre analyse correspond donc au débat collectif, comportant deux phases, dont les échanges sont intégralement transcrits avec le logiciel Transana, très

utilisé pour l'analyse de vidéos en didactique des sciences. La transcription est tout d'abord analysée de façon macroscopique en découpant le débat en épisodes thématiques. Un épisode est un regroupement d'unités sémantiques portant sur un même thème. Les thèmes principaux sont abordés successivement au cours du débat selon l'ordre des items de la grille d'analyse d'articles, constituant ainsi la macrostructure du débat. Les épisodes fortement argumentatifs sont identifiés et sont l'objet d'une opposition entre des thèses opposées.

L'analyse microscopique focalise sur les épisodes les plus intéressants au regard de nos questions de recherche. Une analyse épistémologico-langagière permet de dégager les fondements de l'argumentation développée. Concernant les épisodes fortement argumentatifs, l'élaboration de la structure argumentative permet d'en modéliser la dynamique. Afin de mieux comprendre les positions argumentatives des étudiants durant ces épisodes fortement argumentatifs, est identifiée la phase du travail en petit groupe dans laquelle est discutée la thèse faisant l'objet de l'épisode fortement argumentatif (étape 2). L'analyse des échanges durant le travail de groupe préliminaire permet ainsi d'éclairer le débat collectif (étape 3).

L'étude de l'ensemble des cartes conceptuelles réalisées lors de la dernière séance apporte des informations complémentaires de celles fournies par le débat, contribuant également à répondre à nos questions de recherche.

Notons que la séance d'anglais, destinée à faciliter le travail de lecture des articles par les étudiants, n'est quant à elle pas analysée. Il en est de même pour les grilles d'analyse des articles remplies par les étudiants. En effet, ce sont des outils destinés à orienter le travail d'analyse des articles par les étudiants et à structurer la mise en commun.

4.1.2. Analyse argumentative

Nous partageons la position de M.P. Jiménez-Aleixandre & S. Erduran (2008) sur le rôle central joué par l'argumentation dans la construction des explications, des modèles et théories scientifiques[160]. Aussi étudier l'argumentation des étudiants en classe peut donner accès à la manière dont ils justifient leurs explications, ainsi qu'à la dynamique de la problématisation. Nous étudierons l'argumentation en mobilisant deux outils d'analyse du discours des étudiants : les modèles d'argumentation monologale de S.E. Toulmin et dialogale de C. Plantin.

[160] « Science learning is thus considered to involve the construction and use of tools that, like argumentation, are instrumental in the generation of knowledge about the natural world (Kitcher, 1988). **Argumentation plays a central role in the building of explanations, models and theories** (Siegel, 1995) as scientists use arguments to relate the evidence they select to the claims they reach through use of warrants and backings (Toulmin, 1958). The case made is that argumentation is a critically important discourse process in science, and that it should be promoted in the science classroom (Duschl & Osborne, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000; Kelly et al., 1998; Zohar & Nemet, 2002) » (Jiménez-Aleixandre & Erduran, 2008, p. 4), *c'est nous qui soulignons*.

- **Analyse monologale**

Le modèle d'argumentation monologale de S.E. Toulmin (1993) est particulièrement adapté pour comprendre comment est fondée une argumentation scientifique. Dans le modèle proposé par Toulmin, la conclusion (C) s'appuie sur des données (D). Cette relation s'appuie sur un principe, une règle que Toulmin nomme garantie. Cette dernière repose elle-même sur un fondement (F). La figure 65 schématise ce modèle argumentatif.

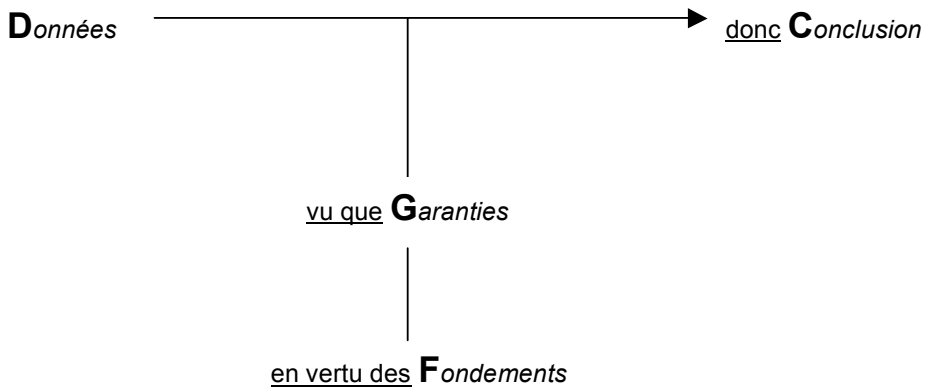


Figure 65 : modèle de Toulmin de l'analyse monologale d'une argumentation (1993, p. 128). Reproduit de Lhoste (2008, p. 145)

Nous cherchons donc à reconstruire les garanties et fondements argumentatifs souvent implicites dans le discours des étudiants. Comme l'indique M.P. Jiménez-Aleixandre (2002), nous n'étudions pas la totalité des phrases des étudiants mais nous focalisons sur les arguments que nous jugeons essentiels au regard des savoirs impliqués[161].

- **Analyse dialogale**

Contrairement au modèle d'analyse argumentative monologale dans lequel l'argumentation n'est pas reliée « explicitement à un contre-discours » (Orange, 2012b, p. 75), le modèle dialogal proposé par C. Plantin est adapté dans le cas où plusieurs thèses s'affrontent. C. Plantin fonde le modèle qu'il nomme trilogue argumentatif en distinguant trois modalités discursives fondamentales : un discours de proposition; un discours d'opposition ; une question (Plantin, 1996, p. 12). À ces modalités correspondent trois rôles discursifs (trois

[161] « Toulmin's (1958) argument layout was employed because it can constitute a powerful tool to analyse classroom discourse. **The analysis does not focus on every sentence, but only on the substantive arguments that require some content knowledge**. The argument components, following Toulmin, are: (a) data; (b) claim; (c) warrants, that is, reasons that justify the connection between data and claim; and (d) backing (background knowledge) of a theoretical or general character to which the warrants are related. Sometimes there are also modal qualifiers and rebuttal » (Jiménez-Aleixandre 2002, p. 1174), *c'est nous qui soulignons*.

actants) : le Proposant tient le discours de proposition, l'Opposant tient le discours d'opposition et le Tiers prend en charge la question. (cf. figure 66).

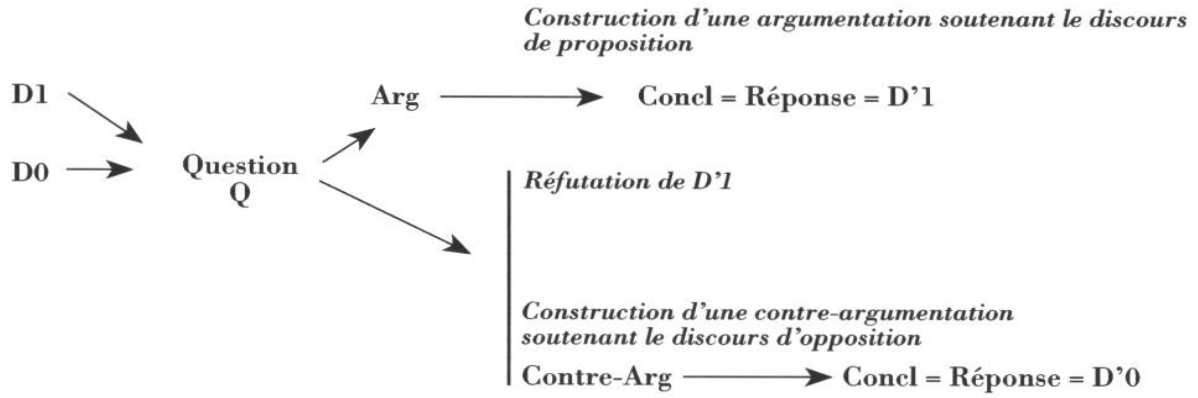


Figure 66 : le modèle du trilogue argumentatif. Reproduit de Plantin (1996, p. 11). D0 et D1 : discours reçu / discours minoritaire ; Arg : arguments

Pour finir la présentation de notre méthodologie d'analyse de données relative à notre recherche de significations (QR1), abordons maintenant l'analyse des cartes conceptuelles mettant en œuvre une nouvelle approche originale.

4.1.3. Analyse des cartes conceptuelles en tant que productions finales

Les cartes conceptuelles sont utilisées en recherche depuis les années 1970. Nous nous sommes penchés dans un premier temps sur les méthodologies d'analyse des cartes existant dans la littérature, que nous entendons présenter succinctement, avant de développer notre propre stratégie.

• Positionnement méthodologique par rapport aux recherches antérieures

Ruiz-Primo & Shavelson (1996) ont réalisé une synthèse de l'utilisation des cartes conceptuelles dans l'évaluation des connaissances des élèves. Ils ont répertorié trois grandes stratégies de notation (*scoring*) des cartes conceptuelles :

- Évaluer les composantes de la carte
- Évaluer en comparaison à une carte de référence
- Combiner les deux stratégies précédentes

L'exemple présenté pour l'évaluation des composantes de la carte est la méthode de notation développée par Novak & Gowin (1984). Un score est attribué pour chaque carte (cf. figure 67) en accordant un point pour chaque proposition valide ; cinq points par niveau de hiérarchie valide ; dix points par lien-croisé signifiant et valide (et seulement deux points par

lien croisé valide, mais qui n'illustre pas une synthèse entre des concepts ou des propositions) et un point par exemple.

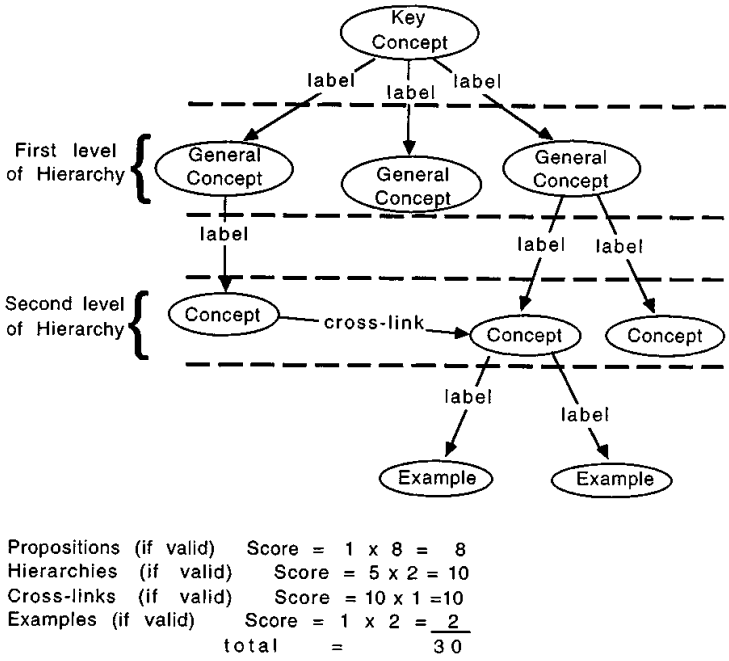


Figure 4. Instructions for the Structural Scoring Method.

Figure 67 : Méthode de notation d'une carte utilisée par Novak et Gowin (1984). Reproduit de McClure *et al.*, 1999, p.483.

D'autres méthodes d'évaluation des composantes de la carte sont développées, comme celle de McClure & Bell (1990), cité par McClure, Sonak & Suen (1999, p. 482), se focalisant uniquement sur les propositions. Pour chaque proposition, sont accordés : un point s'il existe une relation entre deux concepts ou deux points si les mots de liaison sont pertinents ou enfin trois points si la flèche indique une relation hiérarchique, causale ou séquentielle compatible avec les mots de liaison choisis.

Une autre stratégie de notation des cartes consiste en une comparaison avec une carte de référence ou experte établie par les chercheurs (et / ou l'enseignant). Cette méthode mobilise le présupposé qu'une carte représente au mieux les relations conceptuelles dans un domaine précis et pour une question donnée. Il s'agit par exemple de la recherche de Lomask *et al.* (1992), citée par Ruiz-Primo & Shavelson (1996, p. 583). Les auteurs déterminent le nombre de propositions similaires entre la carte des élèves et la carte de référence puis calculent un pourcentage de ressemblance en rapportant ce nombre au nombre total de propositions de la carte de référence. En fonction de ce pourcentage, un score de 1 à 5 est attribué à la carte des élèves.

Quelque soit la méthode de notation, nous pouvons souligner qu'elles sont classiquement utilisées avec une approche expérimentale (type pré et post-test ; comparaison à un groupe témoin) visant à évaluer l'effet d'un enseignement. Ce n'est pas l'approche méthodologique que nous avons retenue.

En effet, nous ne souhaitons pas analyser les cartes produites par les étudiants en comparaison avec une carte dite « experte ». Nous ne pensons pas qu'il existe une unique manière de répondre à la situation-problème. Au contraire, souhaitant étudier le mode de raisonnement des étudiants, nous préférons rester ouverts à leur logique de pensée et ne pas nous enfermer dans la comparaison à une carte de référence.

De plus, nous ne chercherons pas à calculer un score car une note globale ne nous semble pas en mesure de nous renseigner sur la nature des idées mobilisées par les étudiants. Nous partageons donc les critiques émises par Caine & Caine (1994) cités par Kinchin (2001) et I. Kinchin lui-même, ainsi que les réserves méthodologiques sur la nature des critères utilisés (Ruiz-Primo & Shavelson, 1996)[162].

Enfin, ces approches quantitatives comptant le nombre de propositions ou d'exemples sont basées sur l'hypothèse très critiquable que la meilleure carte comprendrait le plus grand nombre de propositions (Kinchin 2011, p. 186).

- **Calcul des occurrences de concepts clés et identification de l'ensemble des propositions comprenant un concept donné**

Afin de faciliter l'analyse de l'ensemble des cartes, nous avons élaboré un script en utilisant le logiciel libre d'analyse données R, déjà utilisé pour l'analyse du questionnaire (cf. chapitre 2). Ce travail est réalisé en partenariat avec Leslie Regad (du laboratoire UMR-S Molécules Thérapeutiques in silico - MTi). Les différentes étapes de l'analyse sont les suivantes.

[162] « It is impossible to communicate the scope and depth of a student's abilities by means of a letter or numerical grade » (Caine & Caine, 1994: 166, cité par Kinchin, 2001, p. 1259).

« I am also critical of quantitative scoring protocols that consider only 'valid' links (as proposed by Novak and Gowin 1984) as I see this as unsupportive of the learning process and at odds with the constructivist philosophy that underlies the use of concept mapping as a learning tool (Kinchin *et al.,* 2000) » (2001, p. 1259-1260).

« One psychometric issue that needs to be addressed with concept maps is whether they can provide reliable scores and representations. How reliable are map scores across raters? Although results reported in the literature suggested high coefficients, these findings should be interpreted cautiously because of the scoring criteria used (e.g., counting map nodes and levels instead of focusing on the validity of the map propositions) » (Ruiz-Primo & Shavelson, 1996, p. 595).

- **Export des propositions pour chaque carte**

Les cartes conceptuelles sont réalisées avec le logiciel gratuit CmapTools[163] développé par l'IHMC - Institute for Human & Machine Cognition (Novak & Cañas, 2008). Ce logiciel fait référence dans la communauté internationale de *concept mapping*. Il permet d'exporter les cartes en mode liste et de comparer deux cartes conceptuelles. Mais il ne peut pas comparer un plus grand nombre de cartes. Dans le but de comparer la totalité des cartes réalisées par nos étudiants, identifier et dénombrer les concepts jugés clés au regard de nos questions de recherche, nous réalisons un script avec R. Pour cela, il est essentiel de préparer un unique fichier compilant les données de l'ensemble des cartes. Pour chaque carte sont exportées l'ensemble des propositions au format texte (txt). Le script élaboré avec R permet alors de compiler les fichiers txt en un seul fichier. Une matrice est générée avec les nœuds ('concepts') et les mots de liaison de toutes les cartes, en indiquant l'occurrence de chaque terme. Cinq cent termes différents sont ainsi recensés pour les treize cartes conceptuelles obtenues, avec des occurrences allant de 1 à 36. Nous faisons le choix de supprimer toutes les majuscules, tous les accents et tous les pluriels. Cela permet par exemple de considérer identiques les termes « Plastes » et « plaste ». Ce remplacement est réalisé de façon « automatique » grâce à quelques lignes de commande. Les fautes d'orthographe sont également corrigées de façon manuelle. De plus, certains étudiants n'ont pas toujours suivi strictement la consigne et ont mis dans un même nœud plusieurs termes différents. Nous décidons de les séparer pour permettre le calcul d'occurrence de différents éléments de discours. Par exemple, le nœud associant les trois techniques « bioinformatique PCR séquençage » est séparé en trois nœuds distincts « bioinformatique », « pcr » et « sequencage ». Un tableau de synonymie est ensuite réalisé, en faisant le choix de garder les termes les plus fréquents. Par exemple, le terme « gradiste » est remplacé par « gradisme » ou encore « l'échelle des êtres » en « echelle des etres ». Nous remplaçons alors dans chaque proposition le terme initial par le (ou les) nouveau(x) terme(s) grâce à la matrice de synonymie établie.

- **Matrice d'occurrence de concepts**

Par rapport à l'ensemble des termes présents dans le jeu de données, tous n'ont pas la même importance pour répondre à nos questions de recherche. L'analyse des articles et de la tâche nous conduit à sélectionner les trente-neuf termes du tableau 32. Certains noyaux lexicaux

[163] Site web du logiciel CmapTools : http://cmap.ihmc.us (consulté le 26 novembre 2015)

sont préférés pour permettre une recherche des différents mots la contenant. Par exemple, le noyau lexical « phylogen » permet d'aller identifier dans les cartes les termes « phylogenie », « phylogenetique » ou « phylogenomique ». Il a été également décidé d'associer certains termes que l'on souhaite dénombrer ensemble. Par exemple, deux espèces servent de « fil rouge » dans l'analyse des articles : l'euglène et la diatomée. Nous choisissons donc de dénombrer les cartes qui citent l'un ou l'autre de ces termes. Ce tableau est la version finale qui a été utilisée pour conduire l'analyse. Une version préliminaire a été établie et a permis d'associer ou de supprimer certains termes. Ainsi par exemple, les termes « whittaker » et « cavalier smith » ont été regroupés dans le tableau final car ils sont cités par les mêmes cartes. Le terme « champignon » a été supprimé du tableau car absent du jeu de données et donc non informatif pour la comparaison des cartes.

Termes retenus	**Raisons du choix**
1. euglene/diatomee	Deux espèces « fil rouge » de l'analyse des articles
2. cyanobacterie/procaryot	La place des cyanobactéries au sein des végétaux dépend du type de classification (fonctionnelle ou phylogénétique)
3. unicellulaire	La place des unicellulaires a été l'objet de rectifications des systèmes classificatoires
4. whittaker/cavalier smith	Deux des quatre auteurs des articles étudiés (regroupés ici car cités dans les mêmes cartes)
5. burki	3^{e} auteur (article phylogénomique)
6. sabine&gasparini	Deux auteurs des articles d'écologie
7. utilitaire	Type de classification anthropocentrée
8. fonctionnel	Type de classification (écologique)
9. phylogen	Type de classification (phylogénétique)
10.homolog/apomorph	Caractère hérité d'un ancêtre commun et état dérivé de caractère utilisés seulement dans les classifications phylogénétiques
11.monophyletique	Type de groupe valide dans la classification phylogénétique
12.polyphyletique	Type de groupe dans la classification phylogénétique, non valide (cas du groupe des végétaux au sens fonctionnel)
13.paraphyletique	Type de groupe dans la classification phylogénétique, non valide dans l'approche cladistique (mais pas dans celle de la Systématique Évolutionniste)
14.cladistique	Méthode de classification, la Systématique Phylogénétique
15.phenetique	Méthode de classification (ressemblance globale)
16.probabiliste	Méthodes de classification phylogénétique intégrant des modèles d'évolution (et non la seule parcimonie)
17.photosynt/autotroph	Caractère physiologique essentiel des végétaux dans une classification fonctionnelle
18.metabolisme	Caractère biochimique distinguant différents groupes biologiques dans une classification fonctionnelle

19.pigment/chlorophyll	Caractère attribué classiquement aux végétaux
20.nutrition	Fonction distinguant différents groupes biologiques dans une classification fonctionnelle
21.eucaryot	Groupe systématique mobilisé ou non pour définir les végétaux selon qu'il s'agisse d'une classification fonctionnelle ou phylogénétique
22.cellule/cellulaire	Niveau d'organisation de l'organisme où se situent beaucoup de discussions concernant les classifications biologiques
23.paroi	Caractère cellulaire essentiel dans l'évolution des idées sur les classifications et le groupe des végétaux
24.plast	Plaste / plastidial : caractère cellulaire essentiel dans l'évolution des idées sur les classifications et le groupe des végétaux. Assure la photosynthèse
25.ecolo	Écologique : type de classification fonctionnelle
26.producteur	Statut écologique des végétaux (producteur primaire) en lien avec une classification écologique
27.chaine/reseau/cycle	Concepts liés à la place des végétaux dans les cycles écologiques en lien avec une classification écologique
28.habitat/milieu/aquatique/terrestre	Concepts liés au milieu de vie en lien avec une classification écologique
29.fixe	La vie fixée ou mobile ont été des caractères importants dans le passé pour distinguer des groupes biologiques (animaux et végétaux)
30.mobile	
31.technique	Les techniques conditionnent l'évolution des idées en science, sur la classification et le groupe des végétaux en particulier
32.pcr/sequencage/moleculaire/bioinfo	Techniques ayant joué un rôle essentiel dans l'évolution des classifications. Donne accès à des caractères moléculaires et leur étude par voie bioinformatique
33.genomique	Étude de l'information génétique à l'échelle des génomes entiers, mobilisée dans les classifications récentes (phylogénomique)
34.microscopie	Technique ayant joué un rôle essentiel en biologie en général et au niveau des classifications en particulier
35.endosymbio	Endosymbiose : théorie expliquant l'origine multiple des plastes chez les Eucaryotes.
36.theori/context/cadre	Théorie, contexte, cadre de pensée : conditionne l'évolution des idées en science, sur la classification et le groupe des végétaux en particulier
37.thall/corm	Thalle et cormus (Thallophytes / Cormophytes) : structure morpho-anatomique à la base d'une ancienne division au sein des végétaux (dans une acception aujourd'hui dépassée scientifiquement)
38.archaeplastidae	Groupe systématique actuellement valide qui est synonyme des végétaux au sens retreint et phylogénétique, pour certains auteurs
39.gradi/fixi/religion	Gradisme, fixisme, religion : registre des idéologies, croyances et valeurs, ayant joué un rôle dans l'évolution des idées

Tableau 32 : choix des 39 termes, association de termes ou de noyaux lexicaux et raisons de ce choix. « / » signifie « ou »

Le script élaboré permet d'identifier la présence ou l'absence de chaque terme dans l'ensemble des cartes conceptuelles du jeu de données. Une matrice de présence des termes par carte est ainsi générée (cf. figure 68) et facilite l'analyse comparative.

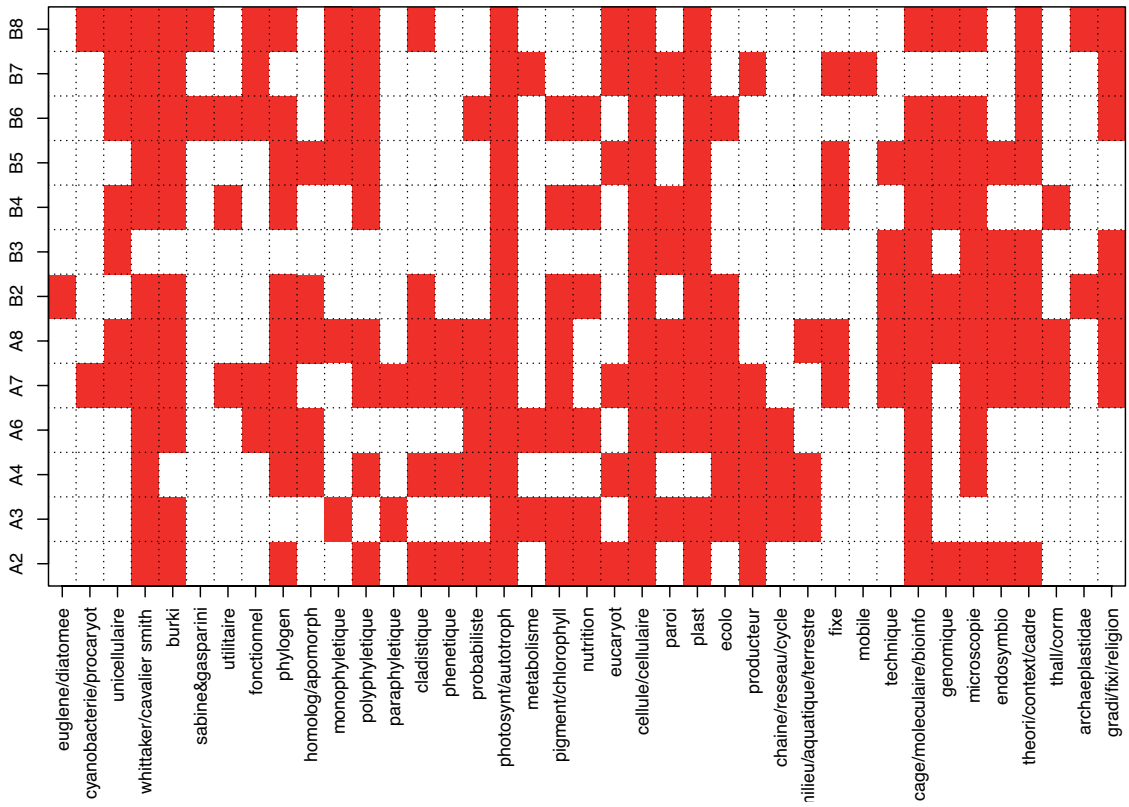


Figure 68 : matrice de présence des termes sélectionnés par carte (en rouge : présence / en blanc : absence). Chaque carte a un code formé d'une lettre (A : premier groupe ; B : second groupe) et d'un chiffre

➢ Analyse des propositions de toutes les cartes

La liste des termes apporte un premier niveau d'analyse. Mais elle fait perdre l'intérêt majeur des cartes conceptuelles qui réside dans l'établissement de propositions indiquant la nature d'un lien entre deux éléments de discours. Aussi, nous élaborons un script qui permet une extraction de l'ensemble des propositions contenant un ou des termes donnés. À titre d'exemple, le tableau 33 présente l'exemple des huit propositions extraites de cinq cartes comprenant les mots contenant les racines « homolog » ou « apomorph ». Cette extraction facilite énormément le travail d'analyse des cartes. Au lieu de chercher dans les cartes une à une les mots qui nous intéressent, au risque d'en manquer, nous pouvons directement focaliser l'analyse sur les propositions. Dans un second temps, il est possible de revenir aux cartes concernées pour situer les propositions d'intérêt dans l'ensemble du réseau conceptuel.

Mot10: homolog/apomorph (huit propositions issues de cinq cartes A4, A6, A8, B2 et B5)
A4: hennig 1965 basee sur homologie hypothese
A6: classification cavalier smith 1981 chromista biliphyta viridiplantae basee sur homologie implicite
A8: methode cladistique se base sur homologie
B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie theorie d endosymbiose theorie de l evolution
B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie bioinformatique pcr sequencage
B2: archaeplastidae sar caracterise par homologie moleculaire position de caractere
B5: crete mitochondriale synapomorphie plaste
B5: monophyletique synapomorphie plaste

Tableau 33 : exemple des propositions pour les termes liés aux noyaux lexicaux « homolog/apomorph »

- **Analyse globale des cartes à l'aide d'une grille d'analyse**

Afin d'étudier comment sont argumentées les raisons de l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux, une grille est construite avec les items suivants.

- Évolution des méthodes de classification
- Prise en compte de l'homologie (référence explicite dans la carte)
- Mobilisation de théories (théorie cellulaire, théorie de l'évolution, endosymbiose...)
- Mobilisation de techniques (microscopie, séquençage, PCR, bioinformatique…)
- Manifestation de valeurs, d'idéologies
- Problème de la place des unicellulaires
- Prise en compte de la photosynthèse dans la séparation entre champignons et végétaux

Pour remplir la grille, nous utilisons la matrice d'occurrence des différents termes (cf. figure 68) que nous croisons avec une analyse des cartes une à une, permise par un nombre restreint de cartes (13).

4.1.4. Méthodologie correspondant à chaque question du premier pôle 1

Le tableau 36 présente la méthode d'analyse pour chaque question de recherche du pôle 1 (recherche de significations).

QUESTIONS DE RECHERCHE	**MÉTHODES D'ANALYSE**
QR1 Recherche de significations : étude des raisonnements et de l'image de la nature de la science des étudiants	
QR1a. Comment différencient-ils les principes spécifiques des classifications fonctionnelle et phylogénétique, que l'on peut distinguer notamment par l'usage de l'homologie ainsi que les conséquences d'une perte de fonction ? Quelles difficultés rencontrent les étudiants et quels obstacles sont mobilisés ?	Analyse du débat relatif aux épisodes de : • l'usage de l'homologie dans les différentes classifications • l'absence de photosynthèse chez certains végétaux
QR1b. Dans quelle mesure les étudiants établissent la relation entre la pluralité des conceptions des végétaux et les différentes classifications de la carte conceptuelle ?	Apport des cartes conceptuelles avec deux niveaux d'analyse pour répondre à cette question : • Analyse des cartes conceptuelles concernant la pluralité des conceptions des végétaux et la relation avec les classifications • Occurrences de mots clés liés aux types de classifications • Analyse des propositions impliquant ces concepts
QR1c. Quelles raisons identifient les étudiants pour expliquer la rectification du groupe des végétaux entre les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes? Comment expliquent-ils la disparition ou la délimitation du groupe des végétaux dans les arbres phylogénétiques actuels ?	- Analyse du débat relatif aux épisodes de : • la définition des végétaux dans les trois systèmes classificatoires des Eucaryotes - Apport des cartes conceptuelles sur ces mêmes thèmes
QR1d. Existent-ils des écarts entre la problématisation de référence développée par les auteurs et celle qui est construite par les étudiants à propos de ces mêmes articles ? Si oui comment peut-on les interpréter : nature des difficultés, obstacles ?	Comparaison de la problématisation développée par les auteurs et par les étudiants à propos des articles par une modélisation : espace des contraintes et des nécessités

QR1e. L'étude de la littérature scientifique primaire donne accès à certaines facettes de l'activité scientifique. Quelle image de la nature de la science mobilisent les étudiants lors de l'analyse des articles scientifiques ?	- Analyse des épisodes du premier débat dédiés spécifiquement aux controverses entre auteurs - Analyse des épisodes du second débat, dédiés spécifiquement à la mise en jeu de valeurs et d'idéologies dans l'activité scientifique - Analyse des épisodes liés à la nature de la science non prévus / émergents - Apport des cartes conceptuelles sur ces mêmes thèmes - Synthèse des différents aspects relevant de la NoS

Tableau 34 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du bloc 1

4.2. Méthodologie relative aux questions de recherche de faisabilités (QR2)

Le tableau 35 récapitule la méthode d'analyse pour chaque question de recherche du pôle 2.

QUESTIONS DE RECHERCHE	MÉTHODES D'ANALYSE
QR2 Recherche de faisabilités : évaluation des choix didactiques et détermination de possibles didactiques	
QR2a. Engagement sur les articles non lus : la présentation croisée des articles associée à débat interne à chaque petit groupe mixte permet-il aux étudiants de s'engager dans le débat collectif sur les articles non lus ?	Comptage du nombre de tours de parole que les étudiants prennent dans la partie du débat relative aux deux articles qu'ils ont lus et dans les deux parties concernant les articles non lus *[indicateur partiel car le nombre d'interventions ne traduit pas la qualité de l'argumentation et le nombre de tours de prises de parole ne renseigne pas sur la compréhension des articles]*
QR2b Quelle est la pertinence du choix des articles proposés aux étudiants articles dans le but de travailler la dualité fonctionnelle et évolutive des classifications et l'évolution des idées relative au groupe des végétaux ? Des documents d'accompagnement des articles apparaissent-ils comme nécessaire dans le contexte de la situation analysée ?	Nombre de citations de chaque auteur dans les cartes conceptuelles en vue d'un éventuel écart à interroger qualitativement Identification des difficultés non prévues lors du débat pour chaque article
QR2c. Quelle est la faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais avec l'accompagnement proposé ?	Identification des difficultés non prévues liées à l'anglais et à des incompréhensions des articles

Tableau 35 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du second pôle

4.3. Méthodologie relative aux questions de recherche sur l'utilisation des cartes conceptuelles (QR3)

4.3.1. Classification hiérarchique des cartes : méthode d'aide au choix des cartes à étudier

L'analyse du processus d'élaboration de la carte ne peut pas être réalisée sur chacune des productions à moins d'y consacrer un temps très important. Nous proposons donc une méthode permettant d'aider au choix des cartes. Une classification hiérarchique des cartes permet d'établir des groupes de cartes ressemblantes au vu des critères de comparaison retenus.

La technique de classification hiérarchique ascendante (ou *hierarchical clustering, hclust*) a été préalablement mise en œuvre dans le cadre de l'analyse non supervisée des réponses au questionnaire (cf. chapitre 2). Il s'agit d'un type de classification automatique visant à répartir les cartes en groupes, chaque groupe devant être le plus homogène possible et les groupes devant être les plus différents possibles entre eux. La hiérarchie s'appuie sur le calcul de distances entre cartes et une méthode d'agrégation qui permet de créer les groupes. La classification est réalisée sur la base de la table de contingence comprenant les treize cartes et les trente-neuf termes (cf. figure 68). La présence d'un terme (case rouge) est codée 1 et l'absence (case blanche) codée 0. Une distance euclidienne[164] est calculée entre les treize cartes deux à deux. Les deux cartes qui ont la distance la plus faible sont donc les plus semblables et sont regroupées formant alors un premier cluster. Il faut ensuite calculer une nouvelle distance entre ce premier groupe formé et les autres cartes. La méthode d'agrégation de Ward, la plus courante, est utilisée à cet effet. L'arbre obtenu (ou dendrogramme) est présenté en figure 69. Dans cette arbre, les deux cartes se ressemblant le plus sont celles qui ont une distance, notée poids (*height*), la plus faible.

[164] La distance euclidienne donne du poids aux différences. Elle est calculée ainsi : $d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(xi - yi)^2}$. Si un terme i est présent ou absent dans deux cartes x et y, la différence xi – yi est nulle. Seuls les cas où un terme est présent dans une carte et absent dans la seconde sont pris en compte dans le calcul de la distance.

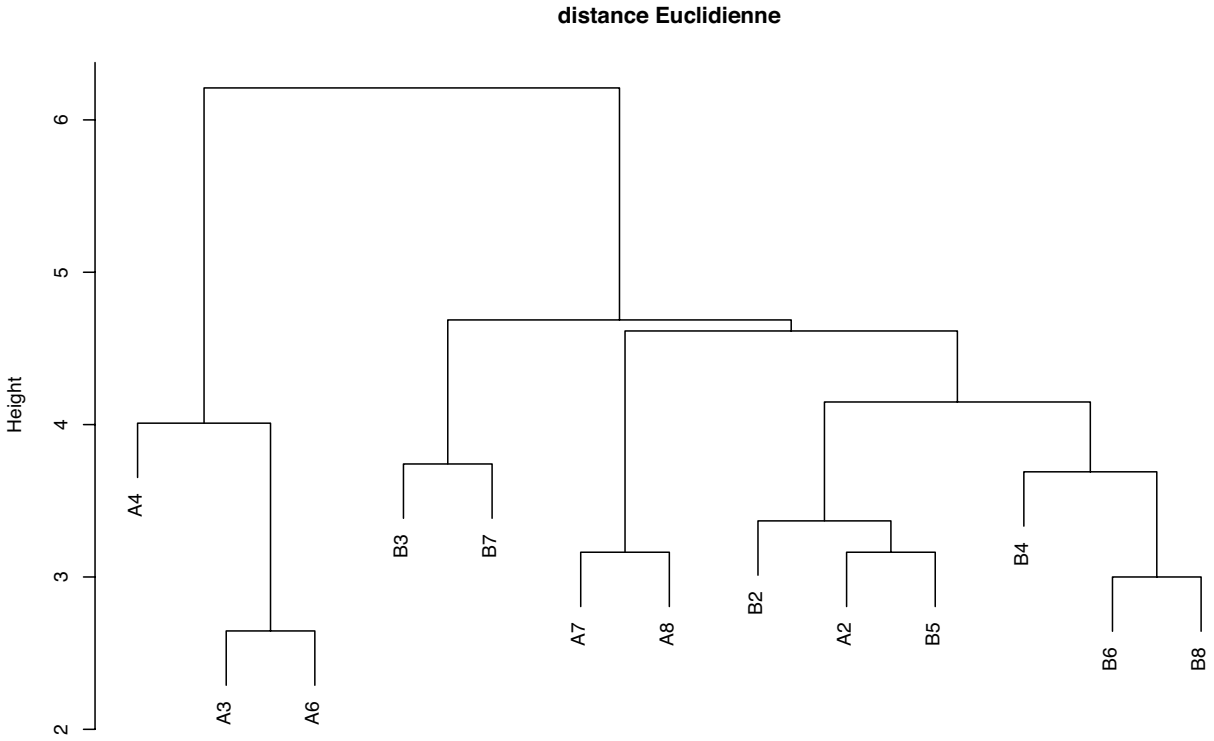


Figure 69 : arbre de ressemblance (dendrogramme) des cartes conceptuelles résultant d'une classification hiérarchique. Chaque carte a un code formé d'une lettre (A : premier groupe ; B : second groupe) et d'un chiffre

SI l'objectif est d'analyser la construction de cartes les plus différentes possibles, il convient d'éviter d'analyser deux cartes regroupées ensemble. Selon le nombre de cartes que l'on souhaite étudier, on peut ensuite prendre une carte d'un cluster formés de trois productions, par exemple une carte parmi le cluster (B2(A2-B5)).

Cette méthode d'aide au choix des cartes a été développée mais finalement non utilisée puisque nous n'avons étudié la construction que d'une seule carte conceptuelle (A7).

4.3.2. Acquisition d'un enregistrement audio-visuel de la construction de la carte

Notre recherche relève donc de l'étude de cas. Elle est exploratoire et possède une visée heuristique. Elle n'épuise donc pas la diversité des possibles et ne cherche pas à caractériser des régularités.

La carte est réalisée par dyade, ce qui oblige les étudiants à argumenter leurs choix pour co-construire une production commune. Un dictaphone permet l'acquisition audio des échanges entre les deux étudiants (cf. figure 70). L'enregistrement vidéo de l'écran (*screencast*) permet d'acquérir un film de l'élaboration de la carte d'une durée d'une heure vingt minutes environ. Les logiciels VLC et QuickTime Player disposent tous deux d'une fonction de capture vidéo du bureau de l'écran et ont été utilisés à cet effet (respectivement sur les postes PC et mac).

La bande son est synchronisée avec le film grâce à un logiciel de montage vidéo (iMovie). Le fichier de la carte réalisée est récupéré au format cmap permettant ensuite d'exporter les données de la carte en mode liste (au format txt) grâce aux fonctionnalités du logiciel CmapTools.

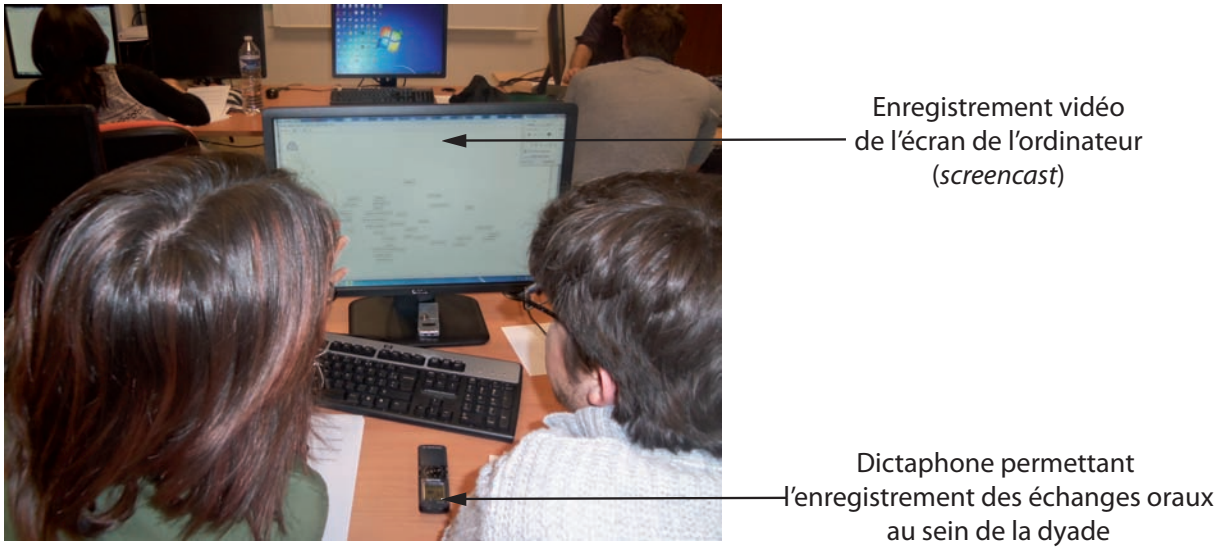


Figure 70 : photographie du dispositif d'acquisition des données audio-visuelles pendant la réalisation de carte conceptuelle par binôme

4.3.3. Transcription

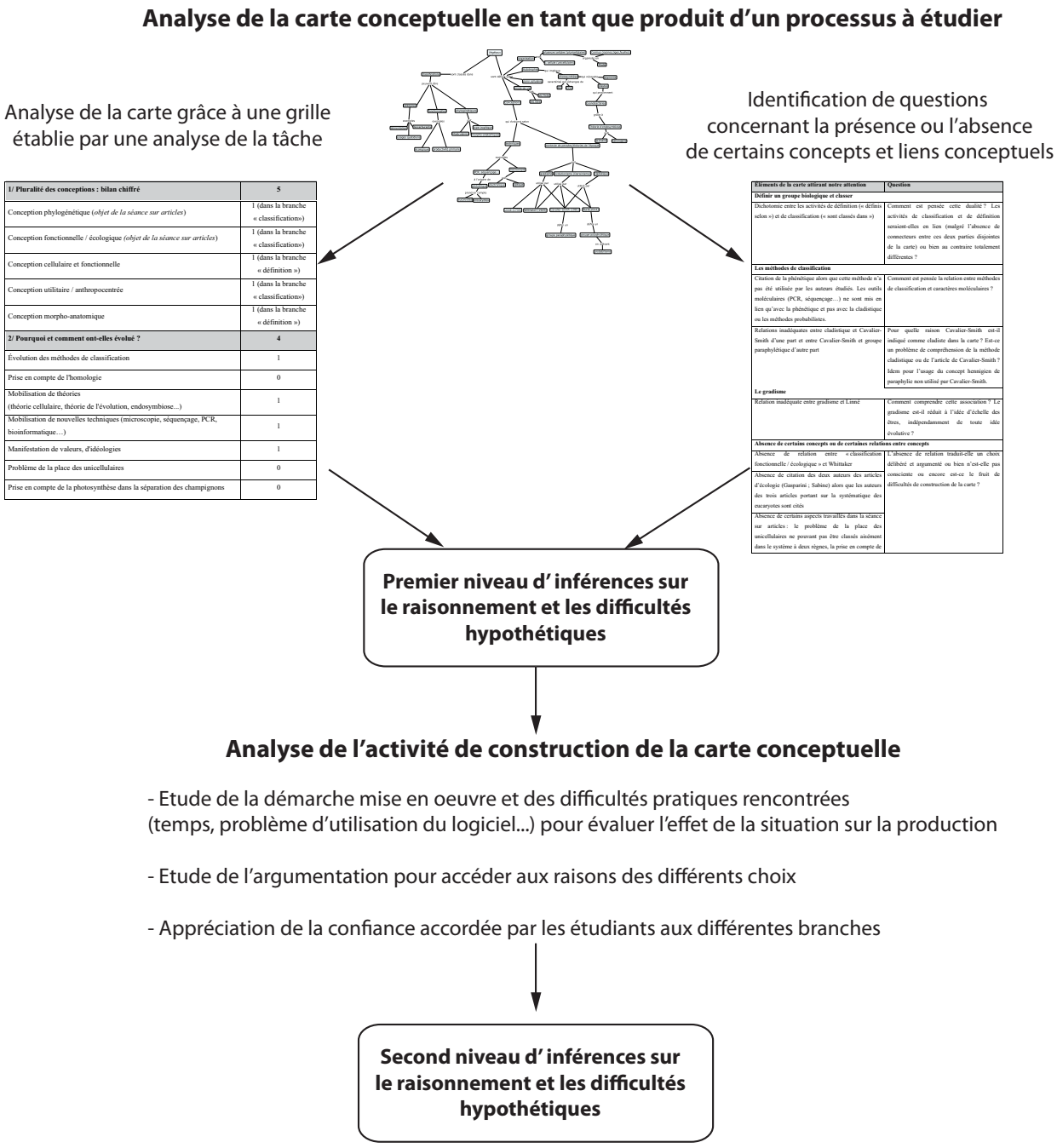
Le corpus est constitué de treize groupes dont un seul a été transcrit. Il s'agit du groupe A7 (Manuella et Helena), choisi pour la richesse de la carte produite et par le souhait de suivre le raisonnement de ces deux étudiantes, qui ont défendu des argumentations intéressantes lors du débat (cf. analyse ultérieure). La transcription est réalisée avec le logiciel Transana. Elle prend en compte les échanges verbaux ainsi que les termes formant les nœuds ('concepts') ainsi que les mots de liaison manipulés à l'écran qui ne sont pas commentés oralement ou avec des termes déictiques ou des pronoms non explicites sans la vidéo (par exemple, « ça » ou bien « on les regroupe ensemble »).

4.3.4. Étapes de l'analyse de la carte conceptuelle

Nous avons étudié la carte en utilisant une grille établie par une analyse *a priori* de la tâche de réalisation de la carte conceptuelle. La consigne de construction de la carte présente deux aspects. Les étudiants doivent en effet dresser le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique et expliquer comment et pourquoi ont évolué ces conceptions. Ces deux dimensions sont examinées successivement. L'étude de la production finale permet d'identifier des questions relatives à certains aspects de la carte en décalage

avec les savoirs scientifiques travaillés durant le débat scientifique ou bien ambigus (choix de certains mots par exemple). L'analyse de la carte permet ainsi de formuler des hypothèses portant sur le raisonnement et les difficultés rencontrées, qu'il convient alors d'interroger grâce à l'analyse de l'argumentation durant la construction de la carte. De plus, certains concepts et autres éléments de discours (e.g. noms des scientifiques étudiés) ou liens conceptuels peuvent être absents de la carte produite. L'étude de la construction de la carte permet de questionner les raisons de cette absence de la production finale. L'analyse de la construction de la carte peut nous apporter des indications concernant la confiance que les étudiants accordent à certaines branches du réseau conceptuel. Enfin, l'étude de la démarche de construction devrait fournir des informations concernant d'éventuelles difficultés pratiques rencontrées par les étudiants (manque de temps, problème d'utilisation du logiciel, etc.) pouvant interférer dans l'activité conceptuelle mise en œuvre.

La figure 71 résume les différentes étapes de l'analyse de l'élaboration de la carte conceptuelle.



1/ Pluralité des conceptions : bilan chiffré	5
Conception phylogénétique (*objet de la séance sur articles*)	1 (dans la branche « classification»)
Conception fonctionnelle / écologique (*objet de la séance sur articles*)	1 (dans la branche « classification»)
Conception cellulaire et fonctionnelle	1 (dans la branche « définition »)
Conception utilitaire / anthropocentrée	1 (dans la branche « classification»)
Conception morpho-anatomique	1 (dans la branche « définition »)
2/ Pourquoi et comment ont-elles évolué ?	**4**
Évolution des méthodes de classification	1
Prise en compte de l'homologie	0
Mobilisation de théories (théorie cellulaire, théorie de l'évolution, endosymbiose...)	1
Mobilisation de nouvelles techniques (microscopie, séquençage, PCR, bioinformatique…)	1
Manifestation de valeurs, d'idéologies	1
Problème de la place des unicellulaires	0
Prise en compte de la photosynthèse dans la séparation des champignons	0

Eléments de la carte attirant notre attention	Question
Définir un groupe biologique et classer	
Dichotomie entre les activités de définition (« définis selon ») et de classification (« sont classés dans »)	Comment est pensée cette dualité ? Les activités de classification et de définition seraient-elles en lien (malgré l'absence de connecteurs entre ces deux parties disjointes de la carte) ou bien au contraire totalement différentes ?
Les méthodes de classification	
Citation de la phénétique alors que cette méthode n'a pas été utilisée par les auteurs étudiés. Les outils moléculaires (PCR, séquençage…) ne sont mis en lien qu'avec la phénétique et pas avec la cladistique ou les méthodes probabilistes.	Comment est pensée la relation entre méthodes de classification et caractères moléculaires ?
Relations inadéquates entre cladistique et Cavalier-Smith d'une part et entre Cavalier-Smith et groupe paraphylétique d'autre part	Pour quelle raison Cavalier-Smith est-il indiqué comme cladiste dans la carte ? Est-ce un problème de compréhension de la méthode cladistique ou de l'article de Cavalier-Smith ? Idem pour l'usage du concept hennigien de paraphylie non utilisé par Cavalier-Smith.
Le gradisme	
Relation inadéquate entre gradisme et Linné	Comment comprendre cette association ? Le gradisme est-il réduit à l'idée d'échelle des êtres, indépendamment de toute idée évolutive ?
Absence de certains concepts ou de certaines relations entre concepts	
Absence de relation entre « classification fonctionnelle / écologique » et Whittaker	L'absence de relation traduit-elle un choix délibéré et argumenté ou bien n'est-elle pas consciente ou encore est-ce le fruit de difficultés de construction de la carte ?
Absence de citation des deux auteurs des articles d'écologie (Gauparin ; Sabine) alors que les auteurs des trois articles portant sur la systématique des eucaryotes sont cités	
Absence de certains aspects travaillés dans la séance sur articles : le problème de la place des unicellulaires ne pouvant pas être classés aisément dans le système à deux règnes, la prise en compte de	

Figure 71 : synthèse présentant le processus d'analyse d'une carte conceptuelle

4.3.5. Méthodologie correspondant à chaque question du troisième pôle

Pour conclure cette section, le tableau 36 présente la méthode d'analyse pour chaque question de recherche du pôle 3.

QUESTIONS DE RECHERCHE	MÉTHODES DE RECHERCHE
QR3 Recherche méthodologique : le concept-mapping comme outil d'analyse du raisonnement et de la problématisation	
• **Concept-mapping et étude du raisonnement des étudiants** QR3a. La carte réalisée (autrement dit la production finale) reflète-t-elle « fidèlement » le raisonnement mis en œuvre par les étudiants lors de sa construction ? S'il existe des écarts entre la production finale et l'argumentation développée pendant la construction, comment les interpréter ? Autrement dit, quelles sont les potentialités de cet outil de recherche mais également quelles sont les limites de l'étude de cartes sans analyser leur construction ?	Analyse de la construction d'une carte conceptuelle (étude de cas) • Proposition d'une méthode de choix de la carte par une analyse des différentes cartes : analyse des différentes productions finales, comparaison basée sur des mots clés et classification hiérarchique des cartes • Transcription des échanges argumentatifs au sein du binôme (pendant 1h20) et de l'évolution de la carte (ajout, suppression de concepts et de connecteurs) • Analyse de la dynamique de construction de la cmap et comparaison avec la production finale pour comprendre les raisons de certaines propositions figurant dans la carte (choix des concepts et nature des liens conceptuels retenus), mais aussi les raisons de la suppression de certains concepts envisagés à un moment de la construction de la cmap. Identification d'éléments de désaccord faisant débat au sein du binôme et analyse argumentative. • Évaluer le poids des contraintes générées par l'outil dans la réalisation de la tâche (par une analyse des difficultés rencontrées)
• **Concept-mapping et étude de la problématisation** QR3b. Dans quelles mesures les cartes conceptuelles peuvent-elles être utilisées pour analyser la construction de problèmes par les étudiants ? L'étude de l'activité de construction de la carte permet-elle de caractériser le double dédoublement caractérisant le processus de problématisation (entre faits et idées d'une part et entre assertorique et apodictique d'autre part) ?	• Analyse de la problématisation relative à un problème travaillé lors de la construction de la cmap : identification de ce qui relève du registre empirique et du registre théorique, identifier les contraintes et les nécessités.

Tableau 36 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du bloc 3

5. Résultats et discussion

Les résultats seront présentés et discutés en abordant successivement les trois grandes questions de recherche : étude des raisonnements liés aux classifications biologiques et image de la nature de la science ; évaluation des choix didactiques de la séquence ; étude méthodologique de l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation. Mais au préalable, analysons les réponses des étudiants au questionnaire initial.

5.1. Analyse des réponses au questionnaire préliminaire

Afin d'engager les étudiants dans la réflexion sur le concept de végétal dans différentes situations de classification, nous avons transmis aux trente étudiants du M1 MEEF SVT le même questionnaire que celui qui avait permis d'étudier les conceptions des étudiants (cf. chapitre 2). La figure 72 et le tableau 37 indiquent que les résultats obtenus deux ans après la première enquête sont tout à fait comparables (cf. p. 111). La fréquence de chaque conception est du même ordre de grandeur.

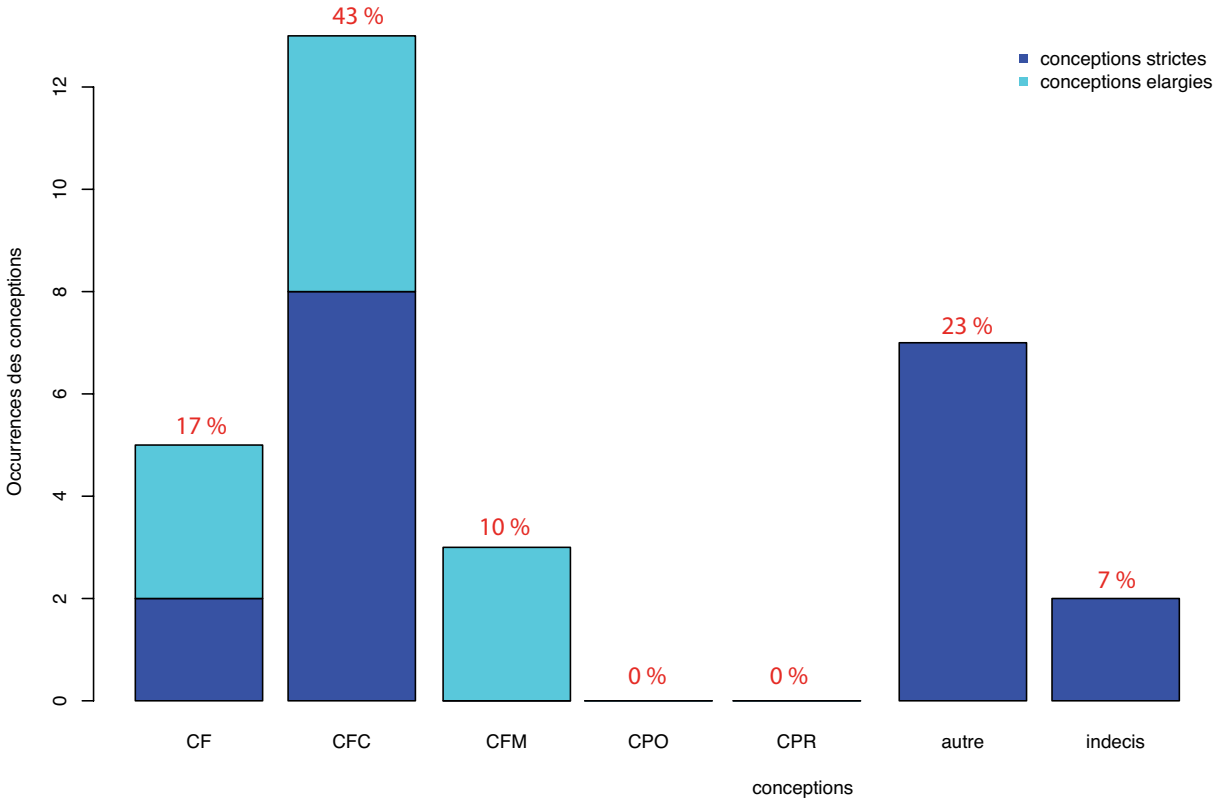


Figure 72 : graphique présentant la répartition des différentes conceptions[165]

[165] Pour mémoire : CF : conception fonctionnelle : CFC : conception fonctionnelle et cellulaire ; CFM : conception fonctionnelle macrocentrée ; CPO : conception par opposition ; CPR : conception phylogénétique réduite.

	Conception fonctionnelle CF	**Conception fonctionnelle et cellulaire CFC**	**Conception fonctionnelle macrocentrée CFM**	**Conception par opposition CPO**	**Conception phylogénétique réduite CPR**	**Autre**	**Indécis**
Nouvelle étude n=30 M1 2014/15	17	43	10	0	0	23	7
1ère étude n=333 M2 2012/13	8	36	9	3	2	29	11

Tableau 37 : comparaison de la répartition des différentes conceptions (ainsi que des catégories « autre » et « indécis) entre les deux enquêtes (en pourcentage)

Il est à noter que les deux conceptions les moins représentées il y a deux ans, à savoir la conception par opposition (CPO) et la conception phylogénétique réduite (CPR), sont cette fois absentes. Toutefois, ce résultat est à mettre en regard de l'effectif bien plus faible du nouvel échantillon (n=30)[166]. Les conclusions tirées de l'analyse portant sur les raisonnements des étudiants nous semblent donc transposables avec le nouvel échantillon d'étudiants avec lequel sera expérimenté la reconstruction didactique.

5.2. Étude des raisonnements et de l'image de nature de la science des étudiants (QR1)

Nous souhaitons ici étudier les raisonnements, les difficultés des étudiants, le processus de problématisation qu'ils mettent en œuvre en lien avec la multiplicité de signification du groupe des végétaux selon les classifications biologiques, ainsi que l'image de la nature de la science qui est donnée à voir dans le cadre de la situation didactique expérimentée. Mais présentons tout d'abord comment le débat s'organise en différents épisodes thématiques, dont l'analyse permettra de répondre à nos questions de recherche.

5.2.1. Analyse du débat en épisodes thématiques

La séance de TD sur articles comprend deux débats collectifs regroupés pour l'analyse et découpés en épisodes, regroupements d'unités sémantiques portant sur un même thème. L'analyse chronologique du débat est présentée en annexe (cf. p. 553). Le tableau 38 présente les épisodes regroupés par thème.

[166] En effet, appliquer le pourcentage de 2 % obtenu il y a deux ans pour la conception phylogénétique réduite (CPR) donne un effectif attendu de 0,6 étudiant. Il n'est donc pas étonnant de ne pas avoir d'étudiant dans cette catégorie conceptuelle. Il en est de même pour la conception CPO (3 %).

Thème (nb d'épisodes concernés)	Épisodes N° de l'épisode-lettre précisant l'article[167] (n° des tours de parole)
Objectif de la classification (4 épisodes)	**2**-G (3-41) ; **8**-W (190-254) ; **15**-C (385-458) ; **22**-B (616-630)
Définir ou classer (3 épisodes)	**2**-G (3-41) ; **7**-G (122-190) ; **30** (879-886)
Méthode de classification (11 épisodes)	**7**-G (122-190) ; **12**-W (337-346) ; **14**-W (360-385) ; **15**-C (385-458) ; **19**-C (549-555) ; **21**-C (591-616) ; **27**-B (789-795) ; **31**-W (896-908) ; **34**-C (1064-1152) ; **35**-C (1064-1152) ; **37**-B (1193-1222)
Que sont les végétaux dans la classification ? (4 épisodes)	**3**-G (42-56) ; **9**-W (255-277) ; **16**-C (459-520) ; **23**-B (630-707)
Place de l'euglène et de la diatomée (4 épisodes)	**4**-G (56-83) ; **10**-W (278-313) ; **17**-C (520-533) ; **25**-B (712-778)
Usage de l'homologie (4 épisodes)	**6**-G (97-122) ; **13**-W (347-359) ; **20**-C (795-864) ; **28**-B (795-864)
Opposition à des systèmes classificatoires antérieurs (4 épisodes)	**5**-G (83-97) ; **11**-W (313-337) ; **18**-C (533-548) ; **26**-B (778-789)
Idéologie, valeurs mobilisées par l'auteur (5 épisodes)	**8**-W (190-254) ; **14**-W (360-385) ; **33**-W (959-1002) ; **36**-C (1152-1193) ; **39**-B (1238-1281)
Conditions de possibilité techniques et théoriques de construction du système classificatoire (3 épisodes)	**32**-W (908-958) ; **35**-C (1064-1152) ; **38**-B (1222-1238)
Image de la nature de la science (autres aspects que ceux liés aux 3 thèmes précédents) (5 épisodes)	**6**-G (97-122) ; **21**-C (591-616) ; **24**-B (707-712) ; **33**-W (959-1002) ; **36**-C 1152-1193
Synthèse (2 épisodes)	**29** (864-892) ; **40** (1282-1289)

Tableau 38 : classement des épisodes du débat par thème

La majorité des thèmes abordés au cours du débat correspond aux items des deux grilles d'analyse d'articles (cf. partie 3.2.3). Des thèmes émergents sont apparus : le thème « Définir ou classer » avec trois épisodes et le thème « Image de la nature de la science » (autres aspects que ceux liés aux items de la grille) avec 5 épisodes. Le dernier thème correspond à la synthèse de chaque débat réalisé par le professeur. Comme les différents problèmes sont abordés successivement en fonction des items de la grille pour chaque article, il ne nous semble pas opportun de réaliser une macrostructure du débat pour « une première identification des problèmes auxquels les élèves se sont attaqués » (Lhoste, 2008, p. 162).

5.2.2. Principes spécifiques des deux types de classifications biologiques

Comment les étudiants différencient-ils les principes spécifiques des différentes classifications fonctionnelle et phylogénétique ? Associent-ils chaque type de classification à au mode de raisonnement qui lui est propre ? L'analyse du débat collectif devrait permettre de répondre en premier lieu à cette question. Enfin, nous étudierons l'apport des cartes conceptuelles à la compréhension de la relation entre les différentes conceptions des végétaux et la pluralité des classifications.

[167] G : Gasparini (2014) et Sabine (2014) ; W : Whittaker (1969) ; C : Cavalier-Smith (1981) ; B : Burki (2014)

- **L'usage de l'homologie selon les deux types de classification**

Nous analyserons successivement les épisodes du débat relatifs à l'usage de l'homologie dans les classifications fonctionnelle puis phylogénétique (s.l.).

➢ La classification fonctionnelle

Nous utiliserons pour nos analyses successives un tableau dans lequel chaque ligne correspond à un tour de parole. Une analyse est proposée pour interpréter chaque verbatim. Un code couleur est proposé pour faciliter l'analyse. L'intégralité de la transcription du débat est proposée en annexe (cf. p. 555). Notons que les noms des étudiants ont été modifiés dans un souci d'anonymat.

Le tableau 39 présente l'analyse de l'épisode 6 relatif à l'homologie dans les deux extraits d'articles écologiques (Gasparini, 2014 ; Sabine, 2014).

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
97	Professeur	alors est-ce que l'homologie est utilisée dans cette classification ?	Énoncé du problème du recours de l'homologie dans la classification écologique
98	Thomas B1	on sait pas	Modalisation logique : doute
99	Valentino W1	oh non c'est pas explicite	Caractère non explicite du recours à l'homologie
100	Florent W1	c'est pas mentionné	Caractère non explicite
101	Thomas B1	c'est pas mentionné / après peut-être mais	Caractère non explicite + doute
102	Professeur	peut-être peut-être pas qu'est-ce que vous en pensez ? est-ce que vous pourriez détailler un petit peu pourquoi est-ce que l'homologie aurait été oui ou non mobilisée dans cette classification ?	Demande de positionnement
103	Valentino W1	il regroupe le phytoplancton sous la / photosynthétique donc sous-entendu peut être un organisme ancestral photosynthétique du coup qui est à l'origine / mais c'est vraiment	Prise de position sur l'usage de l'homologie Caractère non explicite + doute Définition de l'homologie : photosynthèse héritée d'un ancêtre commun
104	Thomas B1	c'est nous qui en tirons c'est	Inférence
105	Professeur	est-ce que ça c'est sous-entendu est-ce que explicitement ou pas / ce serait bien que les autres groupes se prononcent par rapport à ça qu'on puisse / qu'on puisse trancher de manière	Appel au positionnement des autres étudiants
106	Benoît W3	c'est pas explicite je pense que le texte n'est pas assez long pour le coup on ne sait pas s'il a voulu expliquer cette dimension-là on pense que oui [puisque	Caractère non explicite Explication du caractère implicite texte trop court) Doute Prise de position sur l'usage de l'homologie
107	? (étudiant non identifié)	oui]	Prise de position sur l'usage de l'homologie
108	Benoît W3	on ne sait pas vraiment s'il se repose là-dessus on pense que oui parce qu'il regroupe tous ces organismes dans la photosynthèse et après c'est / on ne sait pas vraiment s'il se repose là-dessus / c'est	Doute Prise de position sur l'usage de l'homologie Si regroupement sur la base d'un caractère, il est nécessairement hérité : principe utilisé pour conclure

		pas assez long c'est pas assez explicite pour	Explication du caractère implicite (texte trop court)
109	Thomas B1	soit il est pas assez long soit on n'a pas les références sur lesquelles il s'est appuyé pour [dire ça	2e explication supplémentaire du caractère implicite : manque de références bibliographiques
110	Valentino W1	ouais il ne s'attarde pas dessus en fait]	
111	Thomas B1	si on avait les références bibliographiques si enfin s'il s'était basé je sais pas sur Whittaker sur Y sur X enfin	Étayage de l'argument précédent du manque de références
112	Professeur	alors pour discuter de l'usage de l'homologie ou pas d'ailleurs / il faudrait peut être s'entendre sur ce mot là puisque / dans quel sens vous l'entendez ce mot homologie ?	Mise au clair sur la définition de l'homologie pour établir une référence commune
113	(silence 7 secondes)		
114	Benoît W3	j'ai mis des caractères dérivés d'ancêtre commun	
115	Professeur	alors des caractères dérivés d'ancêtre commun	
116	Valentino W1	transmis par un ancêtre enfin caractère de la descendance transmis par un ancêtre	
117	Professeur	d'accord transmis hérité d'un ancêtre commun / OK / et est-ce que je reviens à la question de départ est-ce que ça c'est évoqué quelque part ?	
118	Laurène B2 et Héloïse C3	Non	Prise de position sur l'absence d'usage de l'homologie
119	Benoît W3	non pas explicitement	Retour sur le caractère non explicite
120	Professeur	d'accord donc / à la question usage de l'homologie dans la classif est-ce que c'est explicitement utilisé ?	Réduction de la question de l'enseignant au caractère explicite de l'usage de l'homologie
121	Benoît W3 (et d'autres)	Non	Prise de position sur le caractère **non explicite** de l'usage de l'homologie (mais pas sur l'usage de l'homologie en réalité)
122	Professeur	d'accord / alors est-ce que vous avez vu aussi une méthodologie donc particulière pour classer les organismes	Fin de l'épisode et passage à une autre question

Tableau 39 : analyse de l'épisode 6 lié à l'homologie dans les deux extraits d'articles d'écologie[168]

L'analyse de cet épisode met en relief qu'il n'est pas du tout évident pour les étudiants que l'utilisation de caractères homologues ne fait pas partie du cahier des charges d'une classification fonctionnelle (ici écologique), dont l'objectif n'est pas de répondre à une question phylogénétique. L'usage répété de modalisateurs logiques de doute (« peut être », « on ne sait pas ») indique que les étudiants sont hésitants et ne veulent pas répondre de manière affirmative pour valider ou invalider le recours à l'homologie pour définir les végétaux dans les articles écologiques. Le caractère non explicite du recours à l'homologie dans les articles contribue à faire douter les étudiants, qui le mentionnent sept fois dans ce

[168] Codage utilisé dans la transcription : aucune ponctuation n'a été ajoutée afin d'être le plus fidèle aux échanges oraux. / : silence ; [ ] : chevauchement entre deux prises de parole ; ? : forme interrogative. ( ) : indication non verbale.

Le prénom des étudiants est suivi d'une lettre indiquant l'article de systématique lu (B : Burki ; C : Cavalier-Smith et W : Whittaker) et d'un numéro indiquant le groupe auquel appartient l'étudiant : 1, 2 ou 3.

court épisode. L'implicite est attribué au fait que le texte analysé (extraits d'articles) soit trop court (106, 108, 109) et sans références bibliographiques (109 et 111). La nécessité de références pointée par Thomas indique qu'il a conscience de l'importance du positionnement d'un auteur au sein d'une communauté scientifique. Cet épisode témoigne d'une confusion entre les principes des classifications phylogénétiques et fonctionnelle. Aucun étudiant n'argumente pour s'opposer à la thèse du recours à l'homologie. Dans cette partie du débat, seul le rôle de proposant (Plantin 1996) est explicitement présent.

- **Les classifications évolutives et phylogénétiques**

Commençons par analyser comment les étudiants perçoivent l'usage de l'homologie par R.H. Whittaker (cf. tableau 40), dont le système à cinq règnes n'est pas phylogénétique, mais a une ambition évolutive.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
347	Professeur	alors est-ce que du coup l'homologie c'est un critère qui est mobilisé ou pas ? est-ce que c'est cité est-ce que c'est évoqué est-ce que c'est utilisé ?	Énoncé du problème du recours de l'homologie dans la classification de Whittaker
348	Marina W3	il l'évoque et il parle beaucoup d'homoplasie aussi et il dit que pour lui l'homologie c'est très important pour faire une classification et un groupe monophylétique / mais il dit que lui il n'a pas réussi à l'utiliser donc il est favorable à l'idée et c'est important mais il n'a pas réussi à l'intégrer dans sa classification à lui	Usage explicite du terme homologie dans l'article. Si l'homoplasie est utilisée alors l'homologie l'est aussi (par contraposée). Conclusion (réponse au problème) : importance de l'homologie pour établir des groupes monophylétiques mais la classification n'a pas pu l'intégrer.
349	Professeur	d'accord donc c'est évoqué il a conscience de la chose mais [c'est pas utilisé concrètement	Demande de confirmation par la reformulation de la thèse
350	Thomas B1	(chuchotant à son groupe) c'est lui aussi Whittaker qui dit que c'est plus cohérent ?	Discussion en aparté dans le groupe 1
351	Valentino W1	que c'est plus logique pour que ça soit viable]	
352	Professeur	dans sa façon de catégoriser	
353	Valentino W1	pour faire quelque chose de vraisemblable il faut l'utiliser	Il faut utiliser des homologies pour une classification « vraisemblable » (phylogénétique ?)
354	Thomas B1	il est mieux d'avoir un groupe monophylétique pardon je t'ai coupé (en s'adressant à Valentino)	Importance des groupes monophylétiques
355	Professeur	mais il ne le fait pas / est-ce qu'il le fait ou est-ce qu'il ne le fait pas ? est-ce que	
356	Valentino W1	il ne fait pas puisqu'il s'autocritique en disant qu'il obtient des groupes polyphylétiques	Groupes polyphylétiques implique le non usage de caractères homologues (mais des homoplasies)
357	Florent W1	en fait il tend à le faire mais il a quand même quelques groupes poly	Souhait d'utiliser l'homologie non réalisé car présence de groupes polyphylétiques
358	Professeur	d'accord OK / donc c'est quand même évoqué	Usage explicite du terme homologie dans l'article
359	Valentino W1	il dit que c'est la principale valeur d'une classification d'obtenir les groupes	Rappel de la thèse formulée initialement en 348 : importance de l'homologie pour

		monophylétiques mais que par exemple / ses trois / ce qu'il appelle ses trois règnes supérieurs sont polyphylétiques	établir des groupes monophylétiques mais n'y est pas arrivés car trois règnes supérieurs sont polyphylétiques

Tableau 40 : analyse de l'épisode 13 lié à l'homologie dans l'article de Whittaker

L'analyse de l'épisode 13 révèle que les étudiants n'ont pas de difficulté à mettre en relation l'importance de l'homologie, citée explicitement dans l'article, pour établir des groupes monophylétiques. Ils ont également bien identifié l'autocritique de R. H. Whittaker dans la discussion finale de son article (1969, p. 158), reconnaissant avoir constitué des groupes polyphylétiques.

Qu'en est-il pour la classification construite par T. Cavalier-Smith qui possède un objectif clairement phylogénétique, ce sur quoi les étudiants se sont mis aisément d'accord lors de l'épisode 15, qui précède l'épisode 16 analysé ici (cf. tableau 41).

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
555	Professeur	pour établir des liens de parenté / d'accord / OK / donc ça nous pousse à l'item suivant qui est de savoir est-ce qu'il utilise l'homologie ou pas comment est-ce qu'il l'utilise / est-ce que / est-ce que c'est quelque chose qui est cité l'homologie est-ce que c'est quelque chose qui est utilisé par lui / est-ce que c'est	Énoncé du problème du recours de l'homologie dans l'article de Cavalier-Smith
556	Aude C1	bah il n'en parle pas / il ne parle pas d'homologie en soi	Caractère non explicite du recours à l'homologie, pas citée
557	Professeur	d'accord il cite pas	
558	Aude C1	Non	Homologie non citée
559	Professeur	est-ce que c'est parce que c'est pas cité que ce n'est pas mobilisé	
560	Thomas B1 (et autres)	non	Non cité, mais pas pour autant non utilisé
561	Professeur	est-ce que vous pensez que ça l'est ou pas et pourquoi	Demande de positionnement sur l'usage de l'homologie
562	Thomas B1	il parle de groupe monophylétique donc euh	Données : groupes monophylétiques
563	Valentino W1et Aude C1	oui il parle de groupes monophylétiques	Données : groupes monophylétiques
564	Thomas B1	donc cela suppose une hypothèse d'homologie quoi	Connecteur logique (implication) Conclusion : utilisation de l'homologie Donne le statut « d'hypothèse » pour l'homologie (ce que ne fait pas Cavalier-Smith), cf. discussion ultérieure
565	Aude C1	il n'emploie pas le terme d'homologie	Terme non cité, non explicite
566	(en parallèle chuchotements non audibles)		
567	Professeur	mais dès l'instant où il construit des groupes monophylétiques de fait il utiliserait des homologies a priori	Reprise par l'enseignant de la thèse avancée précédemment (562-563)
568	Aude C1	Oui	Confirmation de la thèse de l'utilisation de l'homologie

Tableau 41 : analyse de l'épisode 20 lié à l'usage de l'homologie dans l'article de Cavalier-Smith

Bien que l'homologie ne soit pas citée explicitement dans l'article, les étudiants associent facilement la volonté de l'auteur de former des groupes monophylétiques avec la nécessité de n'utiliser que des caractères homologues. Cependant, nous nous devons de souligner que Thomas accorde à l'homologie le statut d'hypothèse (564), en décalage avec la méthode mise en œuvre par T. Cavalier-Smith, qui ne distingue pas l'homologie primaire et secondaire comme le ferait la cladistique. Nous discuterons de ce point ultérieurement.

Terminons l'analyse du recours à l'homologie par l'épisode consacré à l'article de F. Burki (cf. tableau 42).

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
795	Professeur	alors est-ce que il utilise l'homologie dans cette classification ou pas ?	Énoncé du problème du recours de l'homologie dans l'article de Burki
796	Thomas B1	c'est pas mentionné texto	Pas d'usage explicite de l'homologie
797	Professeur	c'est pas mentionné textuellement est-ce que malgré tout vous le pensez ou pas ?	Demande de positionnement
798	Thomas B1	Oui	Prise de position sur l'usage de l'homologie (bien qu'implicite)
(…)			
805	Professeur	oui / est-ce que vous n'avez pas d'autres critères qui vous diraient si à votre avis l'homologie est mobilisée ou pas ?	Demande de justification de la conclusion sur l'usage de l'homologie
806	Thomas B1	après dans son objectif enfin il est parti sur un objectif de phylogénie	Objectif de phylogénie : donnée permettant de conclure
807	Professeur	ouais	
808	Thomas B1	et donc sur d'hypothèse d'homologie primaire [	Connecteur logique (implication) Prise de position sur l'usage de l'homologie Utilisation appropriée (cette fois) du statut d'hypothèse pour l'homologie (cf. discussion ultérieure)
809	Professeur	ouais]	
810	Thomas B1	si je dis pas de bêtise et du coup / ben il y répond plus ou moins en faisant ces groupes et même si il ne mentionne pas le terme de synapomorphie après par exemple pour le groupe des archaeplastida il parle de la présence d'un plaste qui résulte du phénomène d'endosymbiose unique / et il dit que ce serait / enfin il sous-entend que ce serait la synapomorphie du groupe / malgré tout / enfin / il est sur cette façon de classer donc euh	Caractère non explicite Prise de position sur un certain usage de l'homologie : polarisation des caractères (synapomorphie), bien que le terme de synapomorphie reste implicite /sous-entendu Positionnement méthodologique (cladistique)
811	Professeur	d'accord / est-ce qu'il y a pas autre chose qui finalement dans la méthodologie qu'il évoque laisserait entendre qu'il a utilisé l'homologie ? / qu'est-ce qu'il a fait est-ce qu'on peut peut-être / dans la méthodologie ?	Demande de développement d'autres arguments en faveur de la thèse
812	Thomas B1	dans les alignements vous voulez dire ?	Nouvelle donnée : alignements de séquences moléculaires
813	Professeur	ouais / dans les alignements qu'est-ce qu'on fait quand on aligne ?	
814	Valentino W1	ben on sous-entend que c'est homologue	Caractère sous-entendu. Prise de position

			sur l'usage de l'homologie
815	Thomas B1	bah on dit que chaque position est un caractère	
816	Professeur	ouais / et qu'est-ce qu'on suppose de ce caractère si on aligne ?	
817	Laurène B2	qu'il est homologue	Confirmation de la conclusion
818	Professeur	qu'il est homologue / donc quelque part qui dit comparaison de données de séquence dit forcément qu'il a mobilisé euh / qu'il a forcément mobilisé l'homologie	Reprise de la thèse
819	Thomas B1	oui c'est vrai	Confirmation de la conclusion

Tableau 42 : analyse de l'épisode 28 lié à l'usage de l'homologie dans l'article de Burki

Les étudiants n'eurent pas de difficulté à déceler l'implicite du recours à l'homologie dans un contexte clairement phylogénétique. Cette conclusion est mise en relation avec, cette fois, deux données complémentaires : l'objectif phylogénétique de la classification, mais aussi le recours à l'alignement de séquences moléculaires.

Pour ces trois articles, il est important de noter que les étudiants n'ont pas eu de difficulté à identifier l'importance du recours à l'homologie dans un contexte clairement évolutif ou phylogénétique.

Un autre élément permet de différencier les raisonnements liés aux classifications fonctionnelle et phylogénétique : les conséquences de la perte secondaire d'un caractère. Étudions comment est problématisée par les étudiants l'absence de photosynthèse chez certaines espèces considérées comme végétales.

- **Absence de photosynthèse chez certains végétaux**

Le débat a donné à vivre un épisode intéressant concernant la non-monophylie des végétaux (tels que définis précédemment par R. H. Whittaker) pour Cavalier-Smith (1981). Le tableau 43 permet d'analyser le raisonnement mobilisé par les étudiants en lien avec l'absence de la photosynthèse. Le modèle d'argumentation monologale de Toulmin (1993) est mobilisé ici pour accéder aux fondements de l'argumentation.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
459	Professeur	alors que sont alors que sont les végétaux dans cette classification ? est-ce que vous avez réussi à voir comment il les définissait dans cette classification / ouais (en s'adressant à Manuella qui se porte volontaire pour prendre la parole)	
460	Manuella B3	oui euh / donc j'ai dit que / ils sont majoritairement autotrophes mais pas tous donc euh on ne peut pas dire que c'est un groupe monophylétique / si c'est ça	Thèse 1 Donnée : les végétaux ne sont pas tous autotrophes Conclusion : les végétaux ne sont pas monophylétiques
461	Professeur	alors majoritairement autotrophes mais	

		comme ils ne le sont pas tous on peut pas dire que c'est un groupe monophylétique	
462	Manuella B3	euh / ouais c'est un peu / c'est un peu rapide mais	Modalisateur de nuance / d'atténuation du propos (« un peu »)
463	Professeur	est-ce que tu peux préciser un peu ce que tu viens de dire	
464	Héloïse C3	ils ne font pas tous forcément de la photosynthèse	Donnée : les végétaux ne sont pas tous autotrophes
465	Professeur	ouais	
466	Héloïse C3	donc en ce sens là il ne les classe pas comme un groupe monophylétique / c'est pas un caractère qui pourra / qui pourra les regrouper dans un groupe monophylétique	Connecteur logique établissement le lien entre la donnée et la conclusion Conclusion : les végétaux ne sont pas monophylétiques Garantie : un caractère doit être partagé par tous les organismes d'un groupe monophylétique
467	Professeur	alors est-ce que dans un groupe monophylétique tous les représentants de ce groupe possèdent forcément le caractère / possèdent forcément tous le même caractère ?	Questionnement sur la validité de la garantie
468	Thomas B1	(chuchotant au sein de son groupe) non	Opposition à la thèse précédente (mais discrète, restant au sein du groupe 1)
469	Valentino W1	(chuchotant au sein de son groupe) non pas forcément	Confirmation de l'avis de Thomas par Valentino (au sein du groupe 1)
470	Thomas B1	(chuchotant au sein de son groupe) non des fois / [il peut y avoir des réversions / non je dis des conneries	Autre explication : réversion (perte secondaire de la photosynthèse) Modalisateur de doute
471	Aude C1	il ne peut pas se baser sur / en tous les cas sur le caractère de la photosynthèse qui est celui qu'on voit] souvent chez les végétaux déterminant / comme tous ne le font pas on ne peut pas se baser exclusivement dessus pour créer le groupe monophylétique des végétaux qui selon lui / enfin qui selon lui est le sens qui a un sens dans la phylogénie	Reprise de la thèse énoncée 1 par Manuella et Héloïse Donnée : les végétaux ne sont pas tous photosynthétiques Garantie : un caractère doit être partagé par tous les organismes d'un groupe monophylétique
472	Professeur	d'accord donc il cherche à faire un groupe monophylétique il cherche à faire des groupes monophylétiques	
473	Aude C1	il aimerait mais euh	
474	Professeur	il aimerait	
475	Aude C1	mais il se rend compte que par rapport à la photosynthèse qui est le point de départ du groupe il ne peut pas le faire	Reprise de la thèse 1
476	Professeur	d'accord donc finalement pour lui végétaux ils sont photosynthétiques	
477	Aude C1	globalement	
478	Professeur	mais il ne peut retenir ce groupe là	
479	Aude C1	euh / ils sont globalement photosynthétiques et du coup il ne peut pas se baser dessus / d'où après l'utilisation du coup des / des données cellulaires et moléculaires	Donnée : les végétaux ne sont pas tous photosynthétiques Garantie : un caractère doit être partagé par tous les organismes d'un groupe monophylétique
480	Professeur	d'accord / alors est-ce que juste pour revenir là-dessus est-ce que vous pourriez préciser en quoi / le fait que les végétaux soient globalement photosynthétiques	Questionnement sur la validité de la loi de passage (ici la garantie) justifiant la relation entre données et conclusion

		mais pas tous ça ferait qu'ils ne pourraient pas faire un groupe monophylétique / qu'est-ce que vous me dites / qu'est-ce qui est bloquant ? parce que vous avez l'air de dire les végétaux c'est photosynthétique mais je ne peux pas faire un groupe monophylétique parce qu'ils ne le possèdent pas tous / c'est ça ?	
481	Plusieurs étudiants	oui	Confirmation de la thèse 1 par plusieurs étudiants en même temps
482	Manuella B3	c'est ce qu'il dit	Confirmation de la thèse 1 par Manuella

Tableau 43 : analyse de l'épisode 16 lié à la non-monophylie des végétaux

Nous assistons au développement d'une thèse expliquant pourquoi les végétaux ne forment pas un groupe monophylétique, aux yeux des étudiants. La figure 73 modélise l'argumentation développée durant cet épisode. Manuella, qui initie l'argumentation monologale (460-462), ne formule pas explicitement la garantie. Ce sont Héloïse (464-466) et Aude (471-479) qui prennent la suite de Manuella et qui formulent la garantie, mais par une forme négative. Héloïse dit (466) :

> « comme tous ne le font pas [parlant de la photosynthèse] c'est pas un caractère qui pourra / qui pourra les regrouper dans un groupe monophylétique ».

Cela sous-entend que pour former un groupe monophylétique, tous les organismes, sans exception, doivent partager un caractère commun.

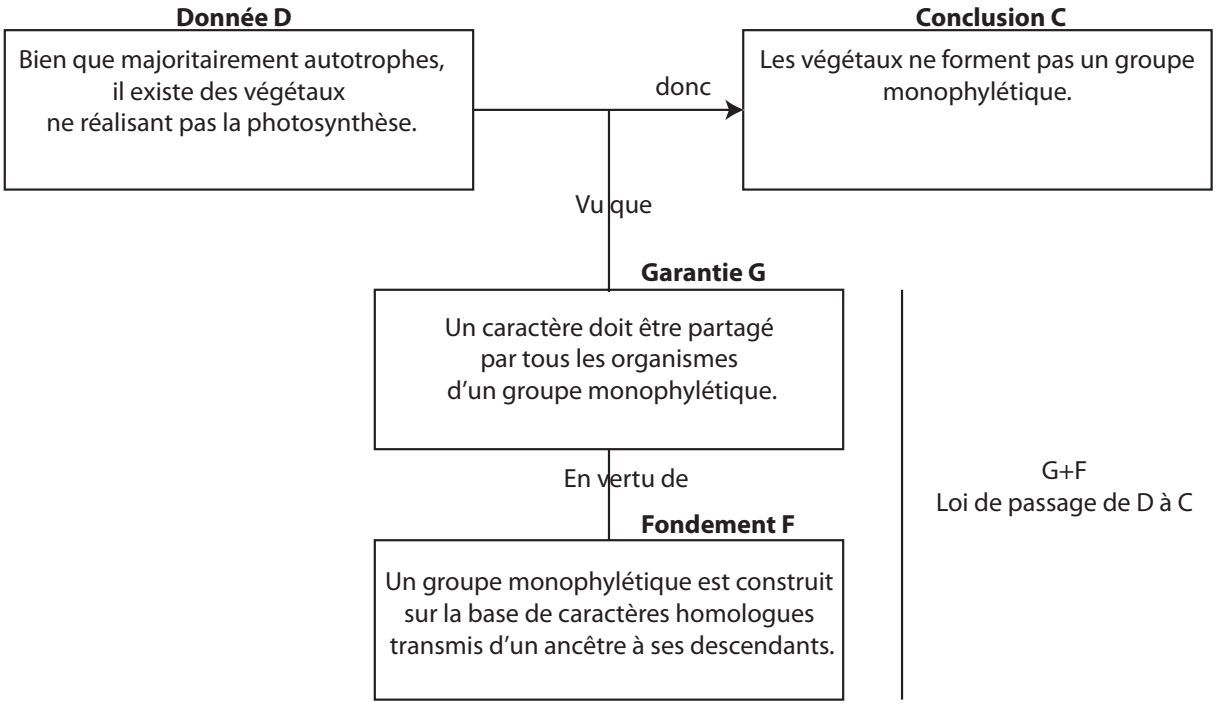


Figure 73 : analyse monologale de la thèse argumentative expliquant la non monophylie des végétaux développée par Manuella, Héloïse et Aude

Le fondement de l'argumentation consiste vraisemblablement en la transmission d'un caractère homologue d'un ancêtre à ses descendants. Il n'est pas formulé explicitement dans cet épisode mais il avait fait l'objet d'une discussion précédente (112-120).

Au cours de cet épisode, Thomas (468-470) remet en cause cette thèse mais de façon très discrète (chuchotement avec son voisin, décelé par le dictaphone posé sur la table du groupe). En évoquant un processus de réversion comme solution possible pour répondre à la question de l'enseignant (467), Thomas pense qu'au sein d'un groupe monophylétique un caractère peut être perdu secondairement au cours de l'évolution (470). Il prend pendant un court instant le rôle discursif d'opposant (Plantin 1996), mais de façon confidentielle. N'étant pas versée au débat collectif, la thèse proposée par Thomas ne permet pas d'engager une controverse dans le groupe. De plus, Thomas réfute immédiatement son propos par une modalisation appréciative (« non je dis des conneries »), traduisant un manque de confiance dans la thèse qu'il avance. Malgré deux questions du professeur portant sur la validité de la loi de passage (467 et 480), les étudiants la confirment (481, 482).

Notons le décalage entre l'argumentation développée par les étudiants dans cet épisode et celle développée par l'auteur lui-même (Cavalier-Smith, 1981, p. 466-467). L'analyse de l'écart entre la problématisation construite par les étudiants et par les scientifiques sera développée ultérieurement.

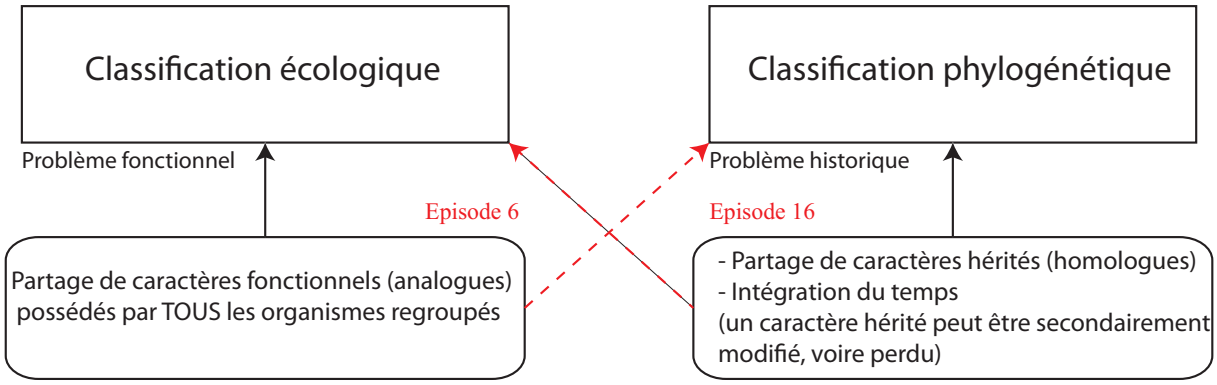
Dressons à présent un bilan de la compréhension des distinctions entre classifications fonctionnelle et phylogénétique en prenant en compte l'usage de l'homologie ainsi que les conséquences de la perte secondaire d'un caractère, la photosynthèse.

- **Bilan concernant les distinctions entre les classifications fonctionnelle et phylogénétique**

L'analyse de l'épisode 16 révèle l'attachement des étudiants à ce qu'un caractère soit présent chez tous les membres d'un groupe monophylétique. Mobilisé dans le contexte d'un problème historique, ce raisonnement - valide pour une classification fonctionnelle - témoigne de la difficulté de mobiliser la dimension temporelle propre à une classification phylogénique, permettant de conduire un raisonnement sur l'évolution des caractères (apparition, modification, disparition).

Au cours de l'épisode 6, le recours inopportun à une hypothèse d'homologie a été mis en évidence dans un contexte fonctionnel. Ces deux épisodes témoignent d'une dissonance au sens de Bakhtine (1984) qui fonctionne dans les deux sens (cf. figure 74). Elle signale la

difficulté des étudiants à prendre en charge les principes spécifiques de chaque classification dans le contexte approprié.



Episode 6 : la photosynthèse permettant de former le groupe fonctionnel des végétaux (au sens écologique) est peut être homologue.
Episode 16 : les végétaux ne forment pas un groupe monophylétique car certains ne réalisent pas la photosynthèse.

Figure 74 : schéma montrant une dissonance concernant le recours aux principes classificatoires[169]

Mais, au cours du débat, cette dissonance n'a pas été perçue par les étudiants. Ce résultat suggère la nécessité d'une intervention de l'enseignant afin de mettre en scène cette dissonance et aider les étudiants à poser le problème. Clarifier les principes spécifiques à chaque type de classification semblerait être une condition de possibilité permettant, dans un second temps, de mieux articuler les problèmes fonctionnels et historiques. Si la question de l'héritage d'un caractère n'est pas utile pour établir une classification fonctionnelle, il peut être fécond, dans un second temps, de questionner sur un plan historique l'origine évolutive des caractères fonctionnels utilisés.

Revenons à présent sur l'explication du polyphylétisme des végétaux (au sens où Whittaker l'entendait) afin de comprendre l'écart entre la problématisation développée par les étudiants et la problématisation développée par T. Cavalier-Smith.

5.2.3. Écarts entre la problématisation développée par Cavalier-Smith et par les étudiants

Nous avons montré précédemment que les étudiants expliquaient le polyphylétisme des végétaux par l'absence de photosynthèse chez certaines espèces (cf. figure 73, p. 333). Par rapport à la problématisation de référence de T. Cavalier-Smith (cf. figure 47, p. 214), quelles sont les différences avec le problème que reconstruisent les étudiants au cours du débat collectif ?

[169] Les caractéristiques propres aux différentes méthodes phylogénétiques n'ont pas été spécifiées pour en rester à la distinction de premier ordre en classifications fonctionnelle et phylogénétique.

Les étudiants construisent la nécessité théorique de la non-monophylie des végétaux au regard de la contrainte empirique de l'absence de photosynthèse chez certains organismes appartenant au groupe des végétaux. Si les étudiants n'intègrent pas la temporalité et la question des pertes secondaires dans leur raisonnement (dans cette situation bien spécifique), Cavalier-Smith intègre évidemment cette préoccupation puisque son objectif est la reconstitution des liens de parenté et de l'histoire évolutive.

Le tableau 44 compare la problématisation des étudiants et de T. Cavalier-Smith.

	T. Cavalier-Smith	**Étudiants**
Contraintes empiriques	Réalisation de la photosynthèse dans des groupes très variés et non apparentés (au sein des procaryotes et des Eucaryotes)	Absence de photosynthèse chez certaines espèces du groupe Plantae (de Whittaker)
Contraintes théoriques	Les groupes systématiques doivent être monophylétiques (s.l.) Les convergences ne doivent pas être utilisées La photosynthèse est convergente	Un caractère doit être possédé par tous les membres d'un groupe monophylétique
Registre explicatif	Registre phylogénétique mais non cladistique	Mélange entre les registres phylogénétique (RP) et fonctionnel (RF) • Former uniquement des groupes monophylétiques (RP) • Regrouper des organismes partageant tous la même fonction (RF)

Tableau 44 : comparaison des contraintes et des registres explicatifs dégagés par T. Cavalier-Smith et les étudiants, leur permettant de construire une même nécessité théorique

Le décalage entre les problématisations construites par les étudiants et par T. Cavalier-Smith est expliqué par la mise en relation de contraintes différentes avec la même nécessité : la remise en cause du règne Plantae au sens de Whittaker, non monophylétique. La différence des contraintes mobilisées peut s'expliquer par une différence concernant le registre explicatif. Là où T. Cavalier-Smith mobilise strictement un registre phylogénétique (bien que non cladistique), les étudiants utilisent quant à eux un registre explicatif mêlant principes phylogénétiques (« ne créer que des groupes monophylétiques ») et principes relevant d'une classification fonctionnelle (« regrouper des espèces partageant toutes une même fonction »).

Étudions à présent les cartes conceptuelles réalisées par les étudiants afin d'analyser comment chaque binôme s'est emparé de la relation entre les différentes conceptions des végétaux et la pluralité des classifications lors de la réalisation de cette tâche.

5.2.4. Relation entre les différentes conceptions des végétaux et la pluralité des classifications : apport des cartes conceptuelles

Chaque carte conceptuelle a été analysée afin d'identifier et de dénombrer les différentes conceptions des végétaux présentes. En effet, la tâche consistait à construire une carte faisant le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique, tout en expliquant comment et pourquoi ces conceptions ont évolué. Nous avons également tenu à chercher si les étudiants mettaient en relation de manière claire et explicite la pluralité des conceptions avec la diversité des classifications. Trois exemples de cartes sont présentés dans le corps de la thèse, les dix autres étant en annexe (cf. p. 592). La première carte ne montre pas de relation explicite entre type de classifications et conceptions des végétaux (cf. figure 75) contrairement aux deux autres (cf. figure 76 et figure 77). Les résultats de l'analyse des treize cartes sont consignés dans le tableau 45 ci-dessous.

	A2	A3	A4	A6	A7	A8	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Nb de cartes (sur 13)	%
Conception phylogénétique	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	**12**	92
Conception fonctionnelle, écologique	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	**9**	69
Conception mixte à dominante écologique	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	**4**	31
Conception cellulaire et fonctionnelle	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	**9**	69
Conception morpho-anatomique	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	**4**	31
Conception utilitaire, anthropocentrée	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	**3**	23
Nb de conceptions dans la carte	**3**	**4**	**2**	**4**	**5**	**4**	**2**	**1**	**4**	**2**	**3**	**4**	**3**		
Mise en relation explicite de la pluralité des conceptions avec la diversité des classifications	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	**5**	38

Tableau 45 : analyse des treize cartes concernant la pluralité des conceptions des végétaux et leur mise en relation explicite avec les différentes classifications (1 : présent (en rouge), 0 : absent)

Toutes les cartes conceptuelles intègrent une pluralité de conceptions des végétaux, à l'exception de la carte B3[170] (cf. annexe, p. 599). Celle-ci ne répond à la consigne que partiellement, puisqu'elle se limite à présenter les raisons de l'évolution des idées. Elle ne présente pas la pluralité de conceptions des végétaux (première partie de la consigne). Si la conception phylogénétique est présente dans toutes les cartes (exceptée la B3), la conception fonctionnelle / écologique est présente quant à elle dans 9 cartes sur 13 (soit 69 %). Quatre groupes indiquèrent l'existence d'une conception mixte à dominante écologique, comme celle résultant de la classification de Whittaker (cf. carte B2 en annexe, p. 598). Trois autres conceptions apparaissent également dans les cartes bien que n'ayant pas été travaillées dans la séquence. La plus fréquente des trois est la conception cellulaire et fonctionnelle, que l'on retrouve présente dans 69 % des cartes et qui domine largement dans les réponses au questionnaire de départ (cf. figure 72). La seconde est la conception morpho-anatomique qui définit les végétaux par leur organisation (comme la présence d'une tige feuillée, le cormus ou d'un thalle). Elle conserve une certaine proximité avec la conception fonctionnelle macrocentrée (CFM) dégagée dans le questionnaire initial. Enfin, il apparaît une conception utilitaire anthropocentrée, bien que moins représentée : 23 % des cartes. Elle n'était pas apparue dans l'étude précédente. Si la première question du questionnaire appelle à définir les végétaux sans inviter explicitement à une pluralité de définitions, la tâche de réalisation de la carte conceptuelle impliquait quant à elle un pluriel, laissant alors la place à une conception utilitaire et anthropocentrée. La figure 75 présente un exemple de carte (B4) faisant appel à la conception fonctionnelle et cellulaire, en décalage avec la séquence expérimentée. Il nous semble important de noter que cette carte décrit l'organisation des végétaux à différentes échelles (cellulaire, morpho-anatomique, écologique), mais sans réellement montrer en quoi cela répond à des problèmes différents pouvant conduire à l'établissement de regroupements d'espèces différentes. Il n'y a pas de relation claire entre les systèmes classificatoires et la pluralité de conceptions des végétaux. Seules 5 cartes sur 13 (soit 38 %) établissent clairement cette relation et attestent d'une prise de distance importante par rapport à la dépendance entre classifications et conceptions des végétaux. Deux exemples sont présentés ci-après (figure 75 et figure 76). La carte présentée en figure 77 est intéressante car elle offre un paradoxe étonnant. En effet, le premier concept lié aux végétaux est la photosynthèse, associé de manière « absolue » à ce groupe biologique défini, dans un premier temps, de

[170] Soulignons que le caractère atypique de cette carte conceptuelle se traduit également par son faible nombre de propositions (25, soit le nombre minimal de l'échantillon) alors que la moyenne est de 42 propositions par carte et le maximum de 64 (carte B6, cf. figure 76).

manière uniquement fonctionnelle. Pourtant, le reste de la carte indique très clairement l'existence d'une multiplicité de conceptions en étroite relation avec les systèmes classificatoires. Pour comprendre ici les raisons de ce qui nous semble un paradoxe, il nous paraît approprié de ne pas se contenter d'analyser la carte en tant que produit de l'activité, mais de porter notre attention sur le processus.

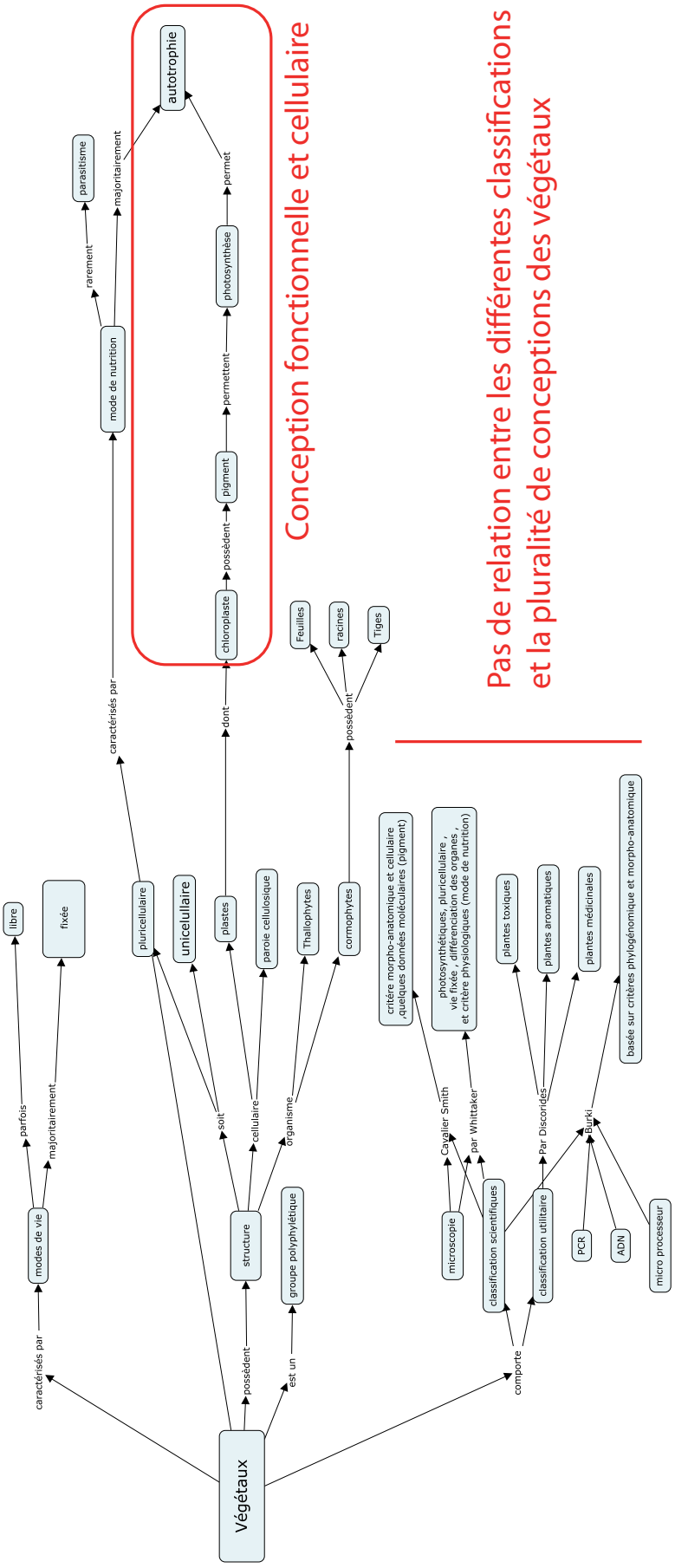


Figure 75 : carte conceptuelle du groupe B4 (34 propositions)

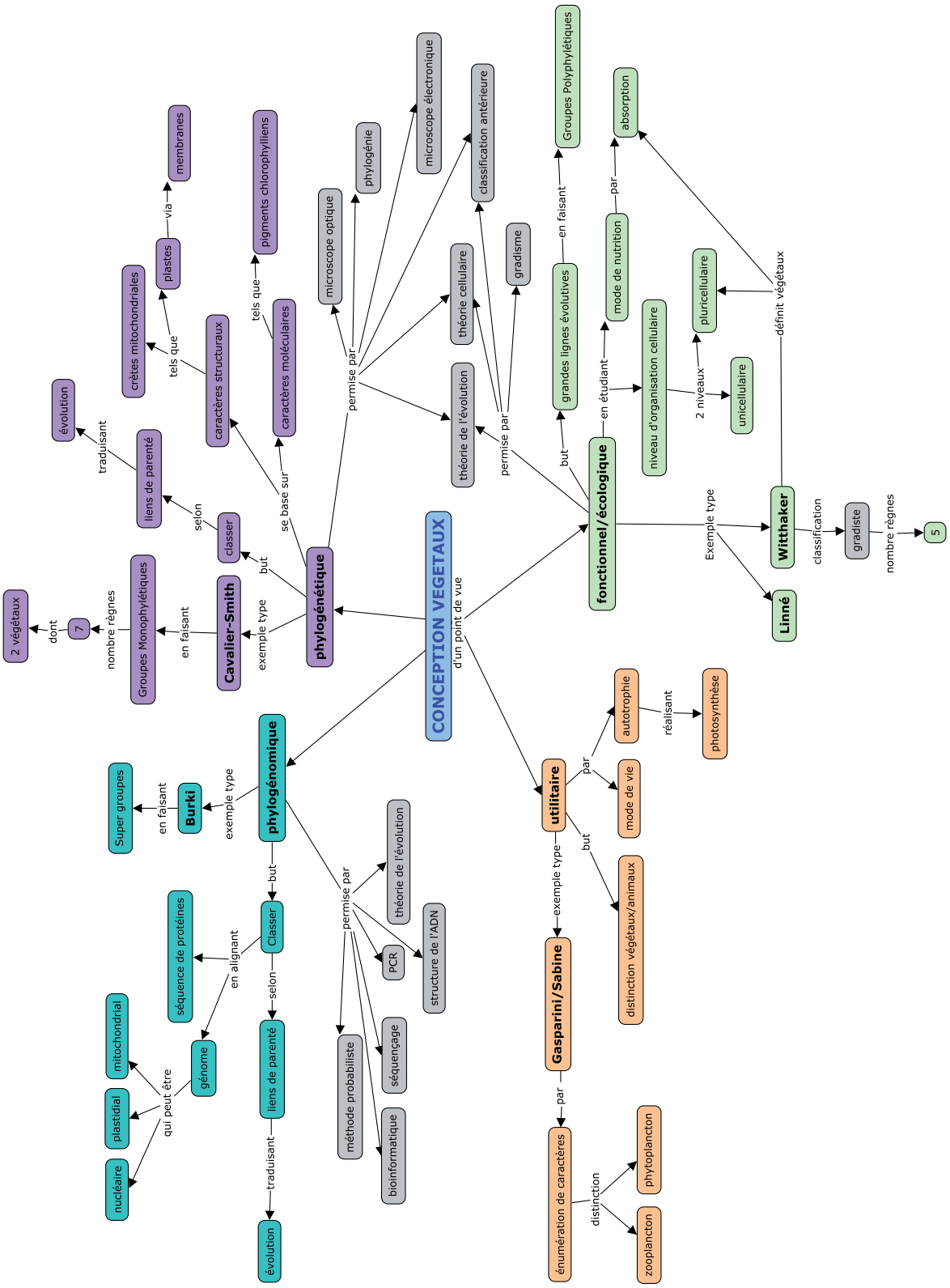


Figure 76 : carte conceptuelle du groupe B6, montrant une relation entre les conceptions des végétaux et différents systèmes de classification[171]

[171] Cette carte contient le nombre le plus élevé de propositions (64), la moyenne étant de 42. Ce nombre n'est qu'un élément de comparaison sachant qu'il n'est pas en lui-même le reflet de la qualité d'une carte.

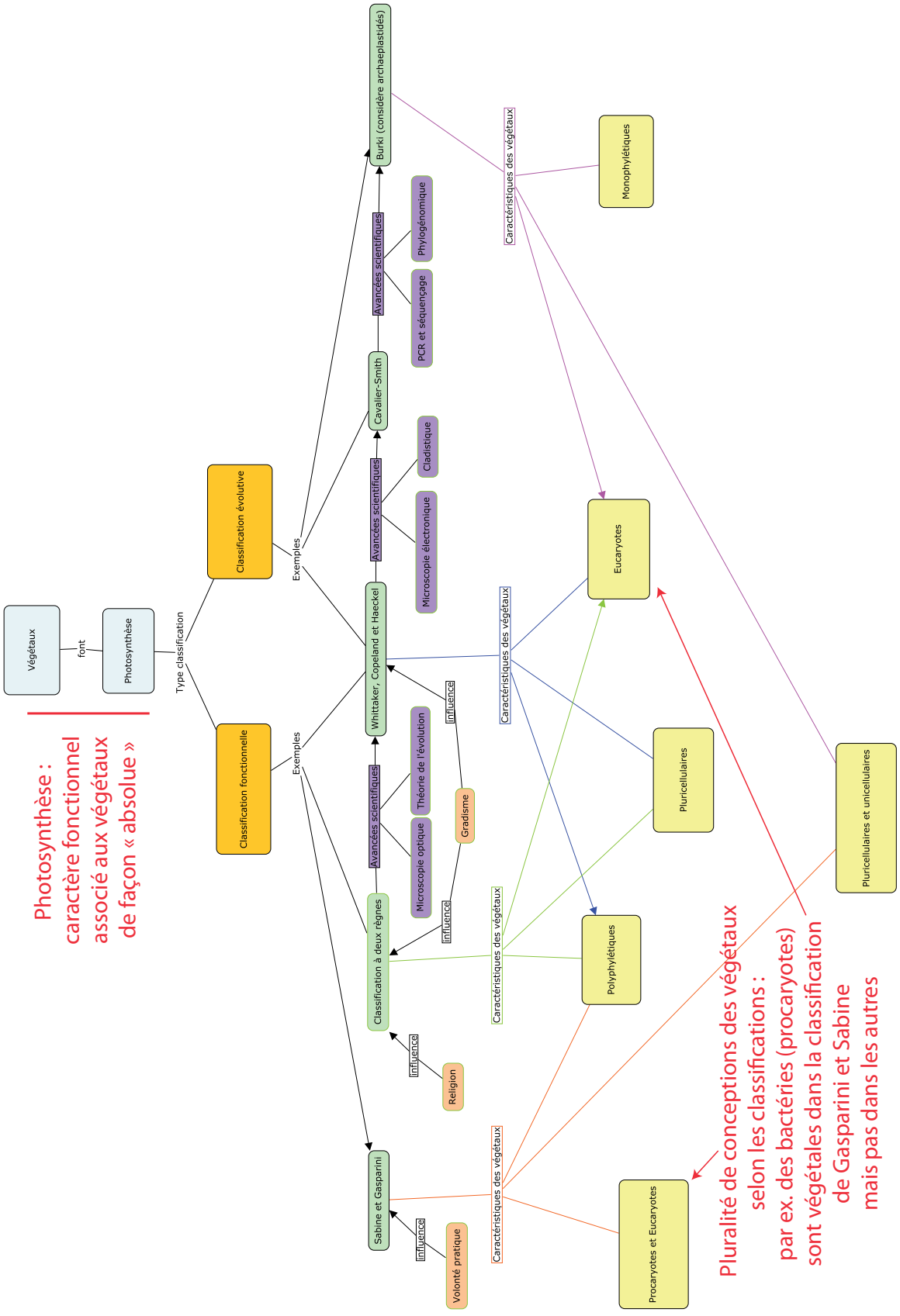


Figure 77 : carte conceptuelle du groupe B8 (34 propositions)

La carte B6 (figure 76) présente une confusion entre les termes « utilitaire » et « fonctionnelle », que l'on retrouve également dans la carte B7 (figure 78). Bien que relativement isolés, ces deux exemples pourraient traduire le manque de compréhension de ce qui fonde la scientificité d'une classification, en particulier la recherche d'explications qu'elles soient de nature historique ou fonctionnelle, et qui permet de distinguer les classifications utilitaires, ayant une autre fonction d'ordre pratique.

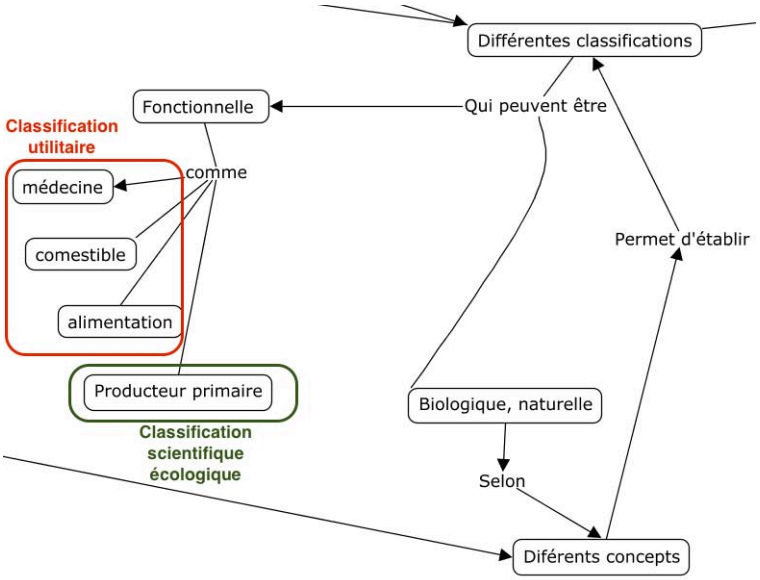


Figure 78 : extrait de la carte conceptuelle du groupe B7 illustrant un usage du terme classification fonctionnelle regroupant deux types de classifications bien différents

Le script informatique développé avec le logiciel R nous permet de disposer d'une vision d'ensemble des propositions présentes dans l'ensemble des cartes concernant ces deux termes ainsi que celui de « phylogen » (permettant d'obtenir tous les mots comprenant ce noyau lexical). Ainsi, nous pouvons accéder aisément à la liste complète des propositions relatives aux trois types de classifications pour analyser la logique de pensée sous-jacente des étudiants et leur cohérence. L'exemple des propositions relatives aux classifications utilitaire et fonctionnelle est présenté ci-dessous.

Utilitaire (3 cartes sur 13)	**Analyse**
A7 : utilitaire exemple biocarburant A7 : utilitaire exemple alimentation A7 : classification peuvent etre utilitaire A7 : utilitaire exemple usage quotidien	Dualité d'usages quotidiens des végétaux : alimentation et biocarburants
B4 : classification utilitaire dioscoride plante medicinale B4 : classification utilitaire dioscoride plante aromatique B4 : classification utilitaire dioscoride plante toxique B4 : vegetal comporte classification utilitaire	Classification utilitaire historique (du grec Dioscoride, 25-90 ap JC) (cf. figure 75)
B6 : utilitaire but distinction vegetaux/animaux B6 : utilitaire par autotrophie B6 : utilitaire par mode de vie B6 : conception d un point de vue utilitaire	Confusion des termes utilitaires et fonctionnelle (cf. figure 76)

B6 : utilitaire exemple sabine et gasparini	
Fonctionnel (5 cartes sur 13)	**Analyse**
A6 : vegetal conception fonctionnelle A6 : fonctionnelle en tant que producteur d o2 A6 : fonctionnelle role dans cycle du carbone	Conception clairement écologique
A7 : classification peuvent etre fonctionnelle A7 : fonctionnelle exemple ecologique A7 : fonctionnelle exemple producteur primaire	Conception clairement écologique
B6 : fonctionnelle ecologique permis par classification anterieure B6 : fonctionnelle ecologique etudie mode de nutrition B6 : conception d un point de vue fonctionnelle ecologique B6 : fonctionnelle ecologique permis par theorie de l evolution B6 : fonctionnelle ecologique permis par gradisme B6 : fonctionnelle ecologique exemple whittaker B6 : fonctionnelle ecologique permis par theorie cellulaire B6 : fonctionnelle ecologique etudie niveau structure cellulaire B6 : fonctionnelle ecologique exemple Linne B6 : fonctionnelle ecologique but grande ligne evolutive	Désigne par fonctionnelle / écologique la classification de Whittaker qui est mixte, d'où certains liens étonnants comme B6 : fonctionnelle ecologique but grande ligne evolutive ». Considère la classification de Linné comme fonctionnelle (comme B8) alors qu'elle avait été pensée dans un contexte fixiste et répondant à un cahier des charges différent (retracer l'ordre divin de la Création). (cf. figure 76)
B7 : fonctionnelle comme alimentation B7 : fonctionnelle comme producteur primaire B7 : fonctionnelle comme medecine B7 : pluralite classification peut etre fonctionnelle B7 : fonctionnelle comme comestible B7 : biologique peut etre fonctionnelle	Regroupement derrière le terme fonctionnelle de classifications scientifiques écologiques et de classifications utilitaires (termes : alimentation, comestible, médecine) (cf. figure 78)
B8 : classification fonctionnelle exemple sabine et gasparini B8 : photosynthese type classification classification fonctionnelle B8 : classification fonctionnelle exemple classification 2 regne B8 : classification fonctionnelle exemple whittaker copeland haeckel	Whittaker, Copeland et Haeckel sont reliés à la fois à « classification fonctionnelle » et « classification évolutive ». C'est conforme au débat pour Whittaker, mais pas pour Copeland et Haeckel, qui n'ont pas mobilisé l'approche écologique de Whittaker. Par ailleurs, la classification à deux règnes de Linné est définie comme étant fonctionnelle comme B6 (cf. figure 77)

Tableau 46 : propositions (deux concepts reliés par un connecteur) des treize cartes relatives aux termes « utilitaire », « fonctionnel »[172]

Le tableau 46 permet donc de mieux percevoir la nature des réseaux conceptuels qui impliquent les termes définissant deux des trois types de classifications. Pour des raisons de longueur du corps de thèse, les nombreuses propositions relatives à la phylogénie sont présentées en annexe (cf. p. 605). Afin de fournir une description synthétique, la figure 79 présente la présence ou non des différents termes ayant trait à la phylogénie (termes encadrés à gauche).

[172] Rappel du protocole permettant de rechercher toutes les occurrences d'un même mot dans l'ensemble des cartes : nous avons enlevé préalablement les majuscules, les accents, les pluriels, définit des synonymes et séparés des mots différents qui ont été rassemblés dans un même nœud.

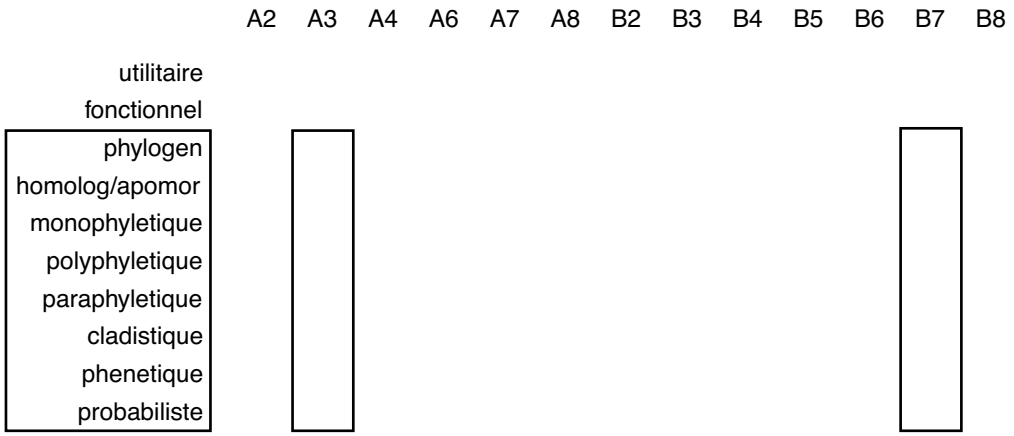


Figure 79 : représentation de la présence (rouge) ou absence (blanc) de concepts dans les 13 cartes

Deux cartes comprennent la conception phylogénétique sans pour autant utiliser explicitement le terme mais en mobilisant d'autres concepts du réseau conceptuel propre à la phylogénie. Il s'agit des termes « monophylétique » et « paraphylétique » pour la carte A3 (utilisés à la place de polyphylétique pour caractériser le groupe des algues) ; « monophylétique » et « polyphylétique » pour la carte B7.

Nous avons discuté de la dualité fonctionnelle / phylogénétique fondant les deux types de classification aux objectifs bien distincts. À présent, observons comment les étudiants comprennent les raisons de la rectification du groupe des végétaux en systématique.

5.2.5. Rectification historique du groupe des végétaux dans la systématique des Eucaryotes

Nous allons étudier successivement le débat puis les cartes conceptuelles.

- **Apport du débat à la compréhension des raisons de l'évolution des idées**

Le débat sera analysé en mettant le focus sur les épisodes ayant trait à la nature du groupe des végétaux dans chacun des trois articles de systématique des Eucaryotes, puis l'importance de l'évolution des méthodes de classification et enfin la dépendance de l'évolution des idées aux théories et techniques.

- **Que sont les végétaux dans chaque classification ?**

Un item de la grille d'analyse porte spécifiquement sur la définition des végétaux dans chaque classification, ce qui a permis de focaliser la lecture et les échanges autour de l'article sur cet aspect, afin d'identifier les raisons de l'évolution du concept de végétal.

- **Les végétaux dans la classification de Whittaker (1969)**

Les étudiants ne rencontrent aucune difficulté à définir ce que sont les végétaux pour Whittaker. En effet, ils disent qu'il y a une « définition bien précise » (256) et qu' « il l'a écrite / il l'avait défini dans son article » (275, 276). Ainsi Pierrik puis Valentino formulent la définition traduite de l'anglais : « organismes eucaryotes pluricellulaires (257) / organismes pluricellulaires avec une paroi possédant généralement une vacuole et des pigments photosynthétiques / un mode de vie qui va être fixé (260) généralement fixé / (avec) un mode de nutrition photosynthétique et une reproduction de type sexué ou asexué (264) / majoritairement photosynthétiques et il y en a quelques-uns qui ont adopté le mode de nutrition absorbotrophe (269-271) ».

- **Les végétaux dans la classification de Cavalier-Smith (1981)**

L'analyse du débat relatif à l'épisode 16 est présentée en annexe (cf. p. 606). Il s'avère plus délicat de définir les végétaux que lors de l'article précédent. Pour Evelyne (488-496), outre la photosynthèse, les végétaux sont définis sur la base de caractéristiques cellulaires : forme des crêtes mitochondriales, structure des flagelles, nombre de membranes plastidiales. Il est pour autant difficile pour les étudiants de pouvoir préciser quel est l'état des caractères communs aux végétaux (493-495). Après une demande de précisions, le professeur n'obtient qu'un long silence révélateur de la complexité de la question dans l'article de Cavalier-Smith et résume la situation ainsi : « ça a l'air compliqué manifestement » (495). Pour Aude, les végétaux ne sont pas définis dans l'article : « moi j'ai pas trouvé que spécialement il le définissait » (500). Pour d'autres étudiants ayant également lu cet article, le groupe des végétaux semble présenter des contours flous. Pour Romina, « il regroupe les différents groupes selon des critères mais on les a pas notés donc on ne se souvient plus trop ce qu'il y avait » (502). Héloïse indique que « non c'est pas clair » (504). La fin de cet échange révèle l'existence de plusieurs règnes végétaux, expliquant la difficulté à qualifier l'ensemble de ces règnes, de nature polyphylétique. Le nombre de règnes est rapidement discuté (trois ou quatre). Pour Evelyne (510-517), il s'agit des règnes Viridiplantae, Biliphyta et Chromista (subdivisé en Cryptophyta et Chromophyta). Le regroupement des deux premiers règnes au sein du groupe des Plantae (proposé à la fin de l'article) n'est pas perçu. Le caractère

polyphylétique de ces différents règnes est supposé par Romina (519) sans pouvoir le justifier. Rappelons qu'il avait été discuté précédemment en lien avec l'existence de groupes végétaux non photosynthétiques (cf. tableau 43).

- **Les végétaux dans la classification de Burki (2014)**

L'épisode 23 du débat collectif est l'objet d'une controverse importante qui met au travail le problème de la définition d'un groupe dans une approche phylogénétique moderne, mobilisant des fondements cladistiques. Autrement dit, que signifie définir un groupe dans une approche cladiste ? Au cours de ce débat, trois thèses furent débattues (cf. figure 80). Cette modélisation est réalisée à partir des arguments développés au cours du débat. Pour chaque thèse, les arguments principaux sont listés dans le tableau 47 alors que l'analyse complète de l'épisode se trouve en annexe (cf. p. 608).

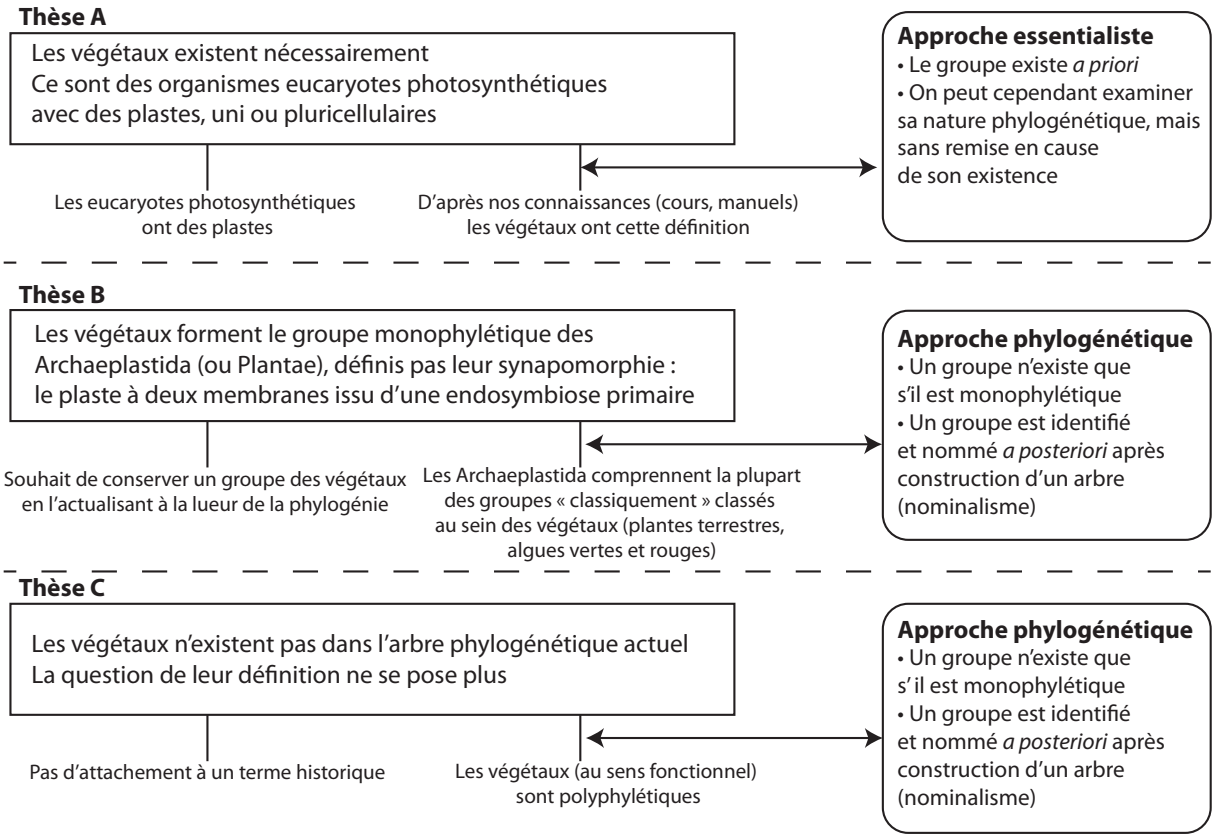


Figure 80 : les trois thèses avancées concernant le problème de la définition des végétaux dans l'article de Burki. La conclusion (encadrée à gauche) est en relation avec des données empiriques ou théoriques. Elle est établie dans un certain registre de pensée.

Une première thèse (notée A) consiste à plaquer une définition *a priori* des végétaux, pourtant absente de l'article de Burki. La définition proposée correspond à la conception fonctionnelle et cellulaire (CFC) qui dominait largement lors de l'enquête à l'échelle nationale. Les deux

étudiantes qui défendent cette théorie (Helena et Manuella) avaient elles-mêmes mobilisé cette conception dans le questionnaire réalisé en début de séquence. Manuella justifie explicitement cette définition par ses connaissances et la description des plastes dans l'article (641, 647). Il nous semble que cette thèse se fonde sur une pensée de type essentialiste. En effet, il est possible que des étudiants opèrent une réification des groupes systématiques en lien avec une pensée essentialiste (cf. p. 137 et 150).

Quant à elles, les deux autres thèses mobilisent cette approche nominaliste, caractéristique de la cladistique. Elles se distinguent par le fait que la thèse B est animée par la volonté de conserver le groupe des végétaux, mais en l'actualisant à la lueur des nouvelles données phylogénétiques. Les végétaux sont alors réduits à une lignée monophylétique valide, les Archaeplastida (ou Plantae, dans une extension restreinte non équivalente à celle utilisée par Whittaker). Cette thèse fait écho à la conception phylogénétique réduite (CPR) dégagée de notre enquête nationale. Enfin, la dernière thèse (notée C) ne s'attache pas au maintien du terme « végétaux » dans un contexte phylogénétique et accepte qu'il n'existe plus dans la classification phylogénétique actuelle.

Lors du débat collectif, Thomas mentionne l'existence d'un débat interne à son groupe de travail pendant la phase préparatoire au débat collectif (633). De manière à mieux comprendre la dynamique argumentative, nous avons décidé de ne pas se contenter d'exploiter le débat collectif mais de le croiser avec le débat interne au groupe 1.

Thèse A « Les végétaux existent nécessairement. Ce sont des organismes eucaryotes photosynthétiques avec des plastes, uni ou pluricellulaires »			
N°	**Locuteur**	**Verbatim**	**Analyse**
Extrait du débat interne au groupe 1, préparant le débat collectif (Helena ayant analysé l'article avec Manuella)			
2	Helena B1	ce serait les organismes photosynthétiques / possédant des plastes / et ils peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires / là il donne pas de / enfin / lui pour lui ça peut être les deux / euh donc euh ils font partie de différents sous-groupes / euh excavates archaeplastidia et les SAR s a r (elle épelle le sigle)	Thèse 1 de l'existence des végétaux pour Burki. Conception fonctionnelle et cellulaire (CFC). Plusieurs sous-groupes phylogénétiques : le polyphylétisme des végétaux ne remet pas en cause l'existence du groupe (pourtant dans le contexte d'un article pourtant phylogénétique)
77	Helena B1	parce que du coup il met bien les animaux dans les opisthocontes / et après dans tous les autres groupes / il parle de / d'organismes / avec des plastes et tout / parce que lui sa définition c'est / organismes avec des plastes / c'est plutôt vers les végétaux	Reprise de la thèse CFC : « végétaux : organismes avec des plastes » qui serait la définition utilisée par Burki pour Helena Dans tous les autres groupes : polyphylétisme (qu'Helena reconnaît sans difficulté par la suite)
Extrait du débat collectif			
631	Manuella B3	c'est les organismes photosynthétiques qui possèdent des plastes / unicellulaires ou pluricellulaires	Proposition d'une thèse (1) correspondant à la conception fonctionnelle et cellulaire (que Manuella avait d'ailleurs mobilisé dans le questionnaire pré-séquence)
644	Professeur	d'accord donc pour toi pour que tu dises	

		ça / tu te bases par rapport à [quoi	
647	Manuella B3	oui bah oui de nos connaissances mais aussi de certains termes qu'il utilise du coup / parce qu' il parle de plastes donc tout de suite effectivement je vais mettre cela dans la définition	Données : les connaissances préalables Reconstruction de la définition non explicite sur la base des connaissances et de l'utilisation du terme plaste dans l'article
668	Manuella B3	forcément les végétaux existent pour lui on est en 2014 / mais il n'en parle pas / enfin explicite / voilà	Affirmation de la thèse de l'existence des végétaux pour Burki : « Forcément les végétaux existent pour lui »
670	Manuella B3	un groupe monophylétique non / mais les végétaux existent / enfin je pense (petit rire)	Ils existent même si leur statut phylogénétique a évolué et ne sont pas monophylétiques
676	Manuella B3	c'est bizarre d'hésiter parce que c'est tellement	Manuella n'arrive pas à comprendre que l'on puisse remettre en question l'existence des végétaux
Thèse B « Les végétaux forment le groupe monophylétique des Archaeplastida (ou Plantae), définis pas leur synapomorphie : le plaste à deux membranes issu d'une endosymbiose primaire »			
N°	**Locuteur**	**Verbatim**	**Analyse**
Extrait du débat interne au groupe 1, préparant le débat collectif (Helena ayant analysé l'article avec Manuella)			
10	Thomas B1	il le mentionne pas donc on sait pas trop / donc en fait comme on est / il inclut un groupe qu'il appelle plantae donc c'est les archaeplastida / donc c'est le groupe que vous voyez en vert ici (montre la figure dans l'article) / dans lequel il inclut les / les algues rouges les glaucophytes et les viridiplantae / les plantes vertes	Modalisateur appréciative, le locuteur exprime un jugement personnel sur une proposition. Donnée : dans l'arbre il existe un groupe monophylétique appelé Plantae ou Archaeplastida
12	Thomas B1	plantes terrestres et donc euh / et après / au niveau des / je suis obligé d'aller plus loin parce qu'au niveau des / caractères qu'il va utiliser / si on se base juste sur le groupe archaeplastida / il parle juste de la présence du plaste qui résulterait d'un phénomène d'endosymbiose unique / et qui sera en fait la synapomorphie du groupe des archaeplastida	Groupe basé sur un plaste résultant de l'endosymbiose primaire (synapomorphie du groupe) => Sous-entendu : en phylogénie on définit un groupe par ses synapomorphies
19	Thomas B1	ouais / ouais complètement / mais en fait nous est parti / à partir du moment où on a vu plantae archaeplastida / même s'il ne donnait pas de définition générale euh / enfin	Végétaux réduits aux Archaeplastida, un groupe monophylétique (conception phylogénétique réduite CPR)
Extrait du débat collectif			
689	Thomas B1	bah je sais pas mais pour moi les végétaux il n'en parle absolument pas et euh / il a un groupe qui peut / enfin si on globalise / il y a un groupe qui ressemble le plus aux végétaux c'est les archaeplastida / mais comme il parle pas de végétaux / on ne peut pas dire que ce sont les végétaux en tant que tel on a envie c'est sûr on a envie / la branche elle est verte on voit qu'il y a un maximum de choses qu'on appelle les végétaux là dedans il y a les gymnospermes les angiospermes les bryophytes ceux qu'on connaît le plus	Formulation d'une thèse : Le terme « végétaux » est absent mais il y a une lignée valide (Archaeplastida) comprenant beaucoup de groupes appartenant aux végétaux (au sens plus ancien) => les végétaux seraient réduits à la lignée des Archaeplastida (cf. débat interne du groupe 1) « Mais… on ne peut pas dire » : modalisation appréciative : qui permet d'introduire une nuance. Il énonce une thèse mais en même temps dit qu'« on ne peut pas dire »
693	Thomas B1	mais non mais non j'vous arrête pas à ça / non mais c'est vrai que la façon dont c'est	Envie de réduire les végétaux à une lignée monophylétique (cf. Conception

		mis ça donne envie	Phylogénétique Réduite CPR)
Thèse C « Les végétaux n'existent pas dans l'arbre phylogénétique actuel. La question de leur définition ne se pose plus »			
N°	**Locuteur**	**Verbatim**	**Analyse**
Extrait du débat interne au groupe 1, préparant le débat collectif (Helena ayant analysé l'article avec Manuella)			
45	Thomas B1	enfin / clairement dans sa classification le groupe des végétaux il n'a plus lieu d'être / on verra après il défonce les termes de règne / tout ça	Changement de position par rapport à la thèse Végétaux = Archaeplastida et passage à la thèse « les végétaux n'existent plus »
76	Thomas B1	moi j'ai mis on peut pas répondre	Thèse on ne peut pas répondre si la diatomée est végétale
79	Florent W1	les euglènes ils sont classés dans quoi ?	Déplacement du problème à un exemple précis (l'euglène**)**
80	Thomas B1	on ne peut pas répondre	
81	Florent W1	oui mais ils sont classés dans quoi ?	
82	Thomas B1	c'est un excavate	
83	Valentino W1	toi t'as mis quoi ? (s'adressant à Thomas)	
84	Thomas B1	moi j'ai mis qu'on peut pas répondre	Rappel de la sa position « on ne peut pas répondre »
85	Valentino W1	on peut pas répondre	
86	Thomas B1	parce que le groupe des végétaux il existe [plus	Car le groupe des végétaux n'existe plus dans la classification actuelle
96	Thomas B1	ouais voilà / si tu pars là-dessus (montre la figure de Whittaker) / en fait le plantae il l'éclate complètement	Les végétaux au sens de Whittaker (Plantae ancienne extension) sont polyphylétiques (« éclatés » dans l'arbre)
98	Thomas B1	clairement avec tout ce qu'il dit / il le met un peu partout / genre les phéophytes ils arrivent chez les straménophiles (*confusion avec straménopiles*) enfin tout ça / donc il l'éclate complètement / et il garde plus ou moins/ même il le garde assez bien / les méta euh les animaux et les végétaux (lapsus avec champignons) qu'il mêle au sein des opisthocontes / tu vois donc en fait / par rapport à la classification / si on se base par exemple si on compare à Whittaker	Précise le caractère polyphylétique avec des exemples, une raison à la non-existence des végétaux et l'impossibilité de les définir
Extrait du débat collectif			
649	Thomas B1	bah le terme végétaux étant pas utilisé / par rapport à Burki lui-même c'est un peu étonnant / après c'est sûr vis-à-vis de nos connaissances / enfin on peut dire c'est un groupe polyphylétique étant donné que / mais après enfin après ça dépend des caractéristiques qu'on lui donne à ce groupe aussi enfin c'est un peu / effectivement si on dit un organisme photosynthétique qu'a des plastes blablabla on va retrouver / dans ces cas-là des végétaux on va en retrouver partout que ce soit chez les SAR que ce soit chez les excavates enfin on va en retrouver partout	Nos connaissances, sous-entendu groupe de végétal tel qu'il était défini antérieurement (par Whittaker par ex ou bien CFC) => recherche de la position dans l'arbre => déduction de la nature polyphylétique de l'ancien groupe végétal Formulation d'une position indiquant qu'il n'existe pas un groupe des végétaux de manière absolue
653	Thomas B1	bah après c'est sûr que si on compare par rapport à Whittaker et à ses trois grands règnes supérieurs qui sont animaux fungi et plantae / les animaux et les fungi on les retrouve chez les opisthocontes mais les	Reprise de l'argumentation expliquant le polyphylétisme des végétaux tels que Whittaker les définissait

		végétaux ils sont complètement éclatés maintenant / si on se base là-dessus / dans les végétaux de Whittaker il y avait / enfin je peux voir l'image / (tourne les pages de l'article de Whittaker) / par exemple dans les plantae de Whittaker il y avait les phéophytes par exemple qu'on retrouve aujourd'hui chez straménophiles	Donnée précise, exemple pour illustrer la thèse de l'éclatement des végétaux (tels qu'ils étaient définis par Whittaker
658	Professeur	mais là ils ne sont pas expressément mentionnés	
659	Laurène B2	ah s'ils ne sont pas mentionnés [c'est que	Thèse alternative à la thèse initiale formulée par Manuella : les végétaux n'existent pas pour Burki
660	Romina C2	pour lui ça n'existe pas]	
661	Laurène B2	pour lui ça n'existe pas oui	
664	Laurène B2	pour moi ce serait rien	Pas de définition car plus d'existence du groupe des végétaux
665	Thomas B1	ouais pour moi aussi	
678	Benoît W3	justement il disait que / les végétaux c'était fini quoi	Soutien de la thèse alternative de non-existence des végétaux dans la classification actuelle
680	Héloïse C3	ils ont quitté du vocabulaire en fait]	Soutien de la thèse : le mot « végétal » n'existe plus dans le vocabulaire de la systématique actuelle
697	Benoît W3	je pense que ce que tu voulais dire c'est que d'un point de vue classement phylogénétique machin les végétaux ça ne peut pas exister scientifiquement parlant mais lui il sait qu'il y a des groupes qui qui	Début de construction des raisons de la non-existence des végétaux en rappelant que c'est dans un contexte phylogénétique moderne Fin de l'explication incomplète et floue. Interprétation possible : mais Burki sait que les végétaux peuvent exister dans un autre registre que phylogénétique (par exemple fonctionnel)
703	Benoît W3	en fait il a voulu le redéfinir donc en fait il part de ce que l'on appelait avant les végétaux et il sait que / euh comment dire / pour lui ça s'appelle plus les végétaux par ce que ce qu'on appelait végétaux avant c'était des groupes polyphylétiques / donc ça peut pas pour lui ça n'a pas de valeur scientifique / ça n'a pas de valeur de classification	Soutien de la thèse de non-existence des végétaux pour Burki Raison : les végétaux au sens ancien sont maintenant polyphylétiques Loi de passage (implicite) : un groupe n'existe en phylogénie que s'il est monophylétique. Un groupe non monophylétique n'existe plus (c'est le cas des végétaux)
704	Professeur	d'accord	
705	Héloïse C3	c'est pour ça qu'il n'en parle pas / mais du coup ouais / j'suis assez d'accord	Soutien de la thèse et de la raison présentée par Benoît
706	Thomas B1	et c'est un peu aussi la base de de sa méthode dans ce que dit Benoît quand il dit il part de ce qu'on sait avant / c'est vrai qu'il s'est beaucoup basé sur les classifications antérieures et ensuite il les a modifiées par rapport aux données phylo comme il dit phylogénomiques qu'il a	Mise en avant de l'importance de la méthode pour définir des groupes. On construit une phylogénie et on nomme et définit ensuite les groupe => approche nominaliste (opposée à une approche essentialiste)

Tableau 47 : analyse d'extraits relatifs aux trois thèses A, B et C

Le débat interne au groupe 1 ayant eu lieu antérieurement au débat collectif, il sera analysé en premier pour, ensuite, comparer avec la dynamique argumentative du second débat.

Cet épisode présente des caractéristiques d'interactions fortement argumentatives, notamment par le fait que le différend « n'est pas réparé instantanément au fil de l'interaction où il est apparu ; il est thématisé dans l'interaction » (Plantin, 2005, p. 56). Afin de suivre la dynamique de l'argumentation au cours de l'épisode, à la suite de Orange, Lhoste & Orange Ravachol (2008), nous proposons de construire une structure argumentative de l'épisode, basée sur le modèle de C. Plantin. Le principe de la schématisation est le suivant :

> « Sur l'axe du déroulement du débat orienté du haut vers le bas, chacune des thèses et les argumentations en sa faveur sont placées sur la même verticale. Les argumentations peuvent être des appuis à une thèse, des objections à une thèse, ou des contre-objections, c'est-à-dire des tentatives pour dépasser une objection. Les liens dynamiques entre ces différents éléments sont signalés par des traits, qui sont barrés lorsque la relation correspond à une opposition » (Orange, 2012bb, p. 55-57).

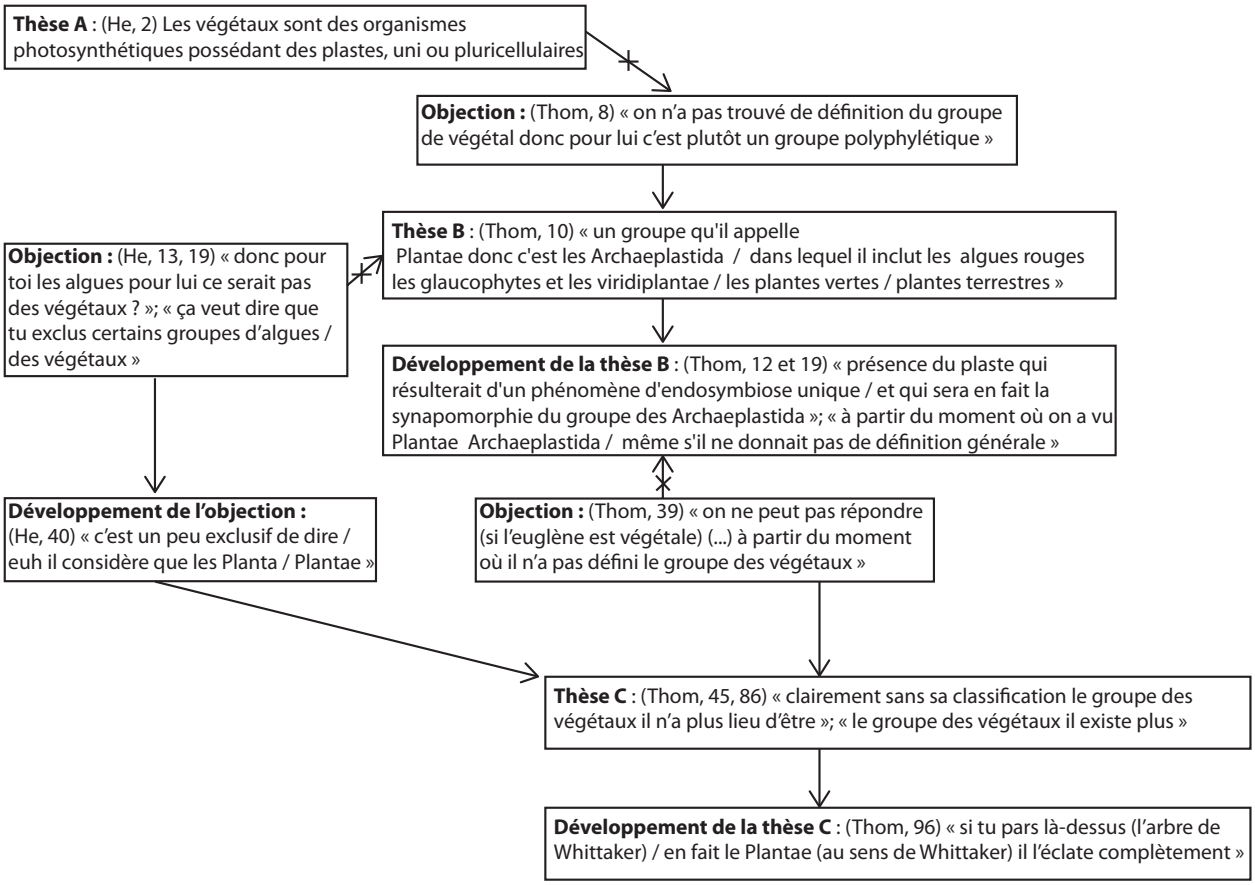


Figure 81 : structure argumentative de l'épisode concernant le problème de la définition des végétaux dans l'article de Burki au sein du groupe 1 (débat interne préliminaire)

La structure du débat interne au groupe 1 est présentée en figure 81. Forts de la lecture de l'article de Burki dans des groupes distincts, Helena et Thomas seront les deux acteurs majeurs de la controverse endossant tour à tour les rôles de proposant et d'opposant. Helena

est à l'origine de la thèse A énoncée au début de l'épisode par la lecture de la grille d'analyse de l'article, remplie avec Manuella et Karima.

Thomas s'y oppose : « Les SAR et les excavates c'est pas des végétaux » affirme-t-il dès le début du débat (6). En raison du polyphylétisme des végétaux, il propose la thèse B selon laquelle les végétaux seraient réduits aux Archaeplastida pour Burki.

Mais plus tard, Thomas bascule vers la thèse C lors de la discussion concernant l'euglène. En effet, Thomas objecte qu'on ne peut pas répondre si l'euglène est végétale ou non « à partir du moment où il n'a pas défini les végétaux » (39). Or, selon la thèse B, la réponse attendue est que l'euglène n'est pas végétale car n'appartenant pas aux groupes des Archaeplastida, mais des Excavates. Thomas bascule alors vers la thèse C de non-existence des végétaux pour Burki (45, 86). L'argument majeur est le polyphylétisme des végétaux (au sens où l'entendait Whittaker), pourtant déjà évoqué dans le cadre de la thèse B. Il est difficile d'apprécier l'importance de l'objection d'Helena (40) à la thèse B dans le basculement vers la thèse C car son argument, à savoir le caractère limitatif et réducteur des végétaux aux seuls Archaeplastida, ne fut pas repris par Thomas au cours du débat.

Durant cet épisode, Valentino, n'ayant pas lu l'article de Burki, a joué le rôle de tiers de deux façons différentes : en questionnant (65, 83) et en contribuant ainsi à faire vivre la question au sein du débat ; ou en pointant explicitement le désaccord (44, 73).

> « la preuve vous êtes pas d'accord entre vous » (Valentino, 44)
>
> « et pour les diatomées du coup ? » (Valentino, 65)
>
> « donc toi t'as mis oui (s'adressant à Helena) et toi t'as mis non (s'adressant à Thomas) » (Valentino, 73)
>
> « toi t'as mis quoi ? (s'adressant à Thomas) » (Valentino, 83)

Suite à ce débat interne au groupe 1, analysons le débat collectif qui a eu lieu postérieurement. Il va nous permettre de comparer la dynamique argumentative des deux débats relatifs au même problème. La structure de l'épisode 23 est présentée en figure 82.

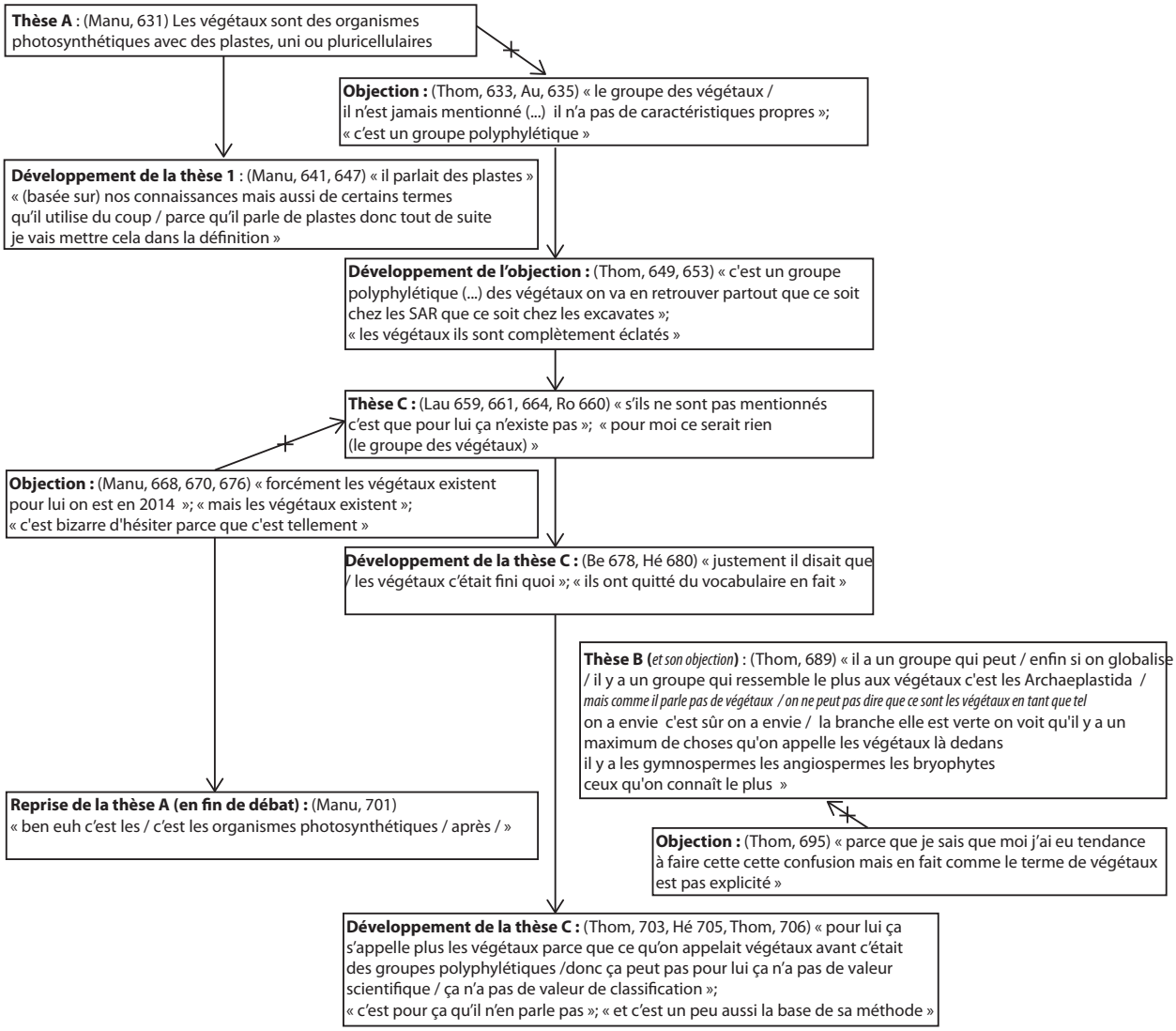


Figure 82 : structure argumentative de l'épisode 23 du débat collectif concernant le problème de définition des végétaux dans l'article de Burki

L'épisode débute par la formulation de la thèse A d'existence des végétaux pour Burki, comme lors du débat interne au groupe 1. Manuella endosse le rôle de proposante défendant cette thèse, sachant qu'elle a travaillé avec Helena sur l'article en amont de cette séance. Il est très frappant de constater que la suite de la dynamique argumentative diffère de celle du débat interne au groupe 1.

En effet, Thomas s'oppose à Manuella mais en avançant la thèse C et non la thèse B comme il l'avait fait lors du précédent débat interne. Il formule par la suite du débat la thèse B (réduction des végétaux aux Archaeplastida) mais en réfutant aussitôt cette thèse (689, 695). Thomas ne permet pas à cette thèse de vivre dans le débat collectif. Nous pouvons supposer que le basculement vers la thèse C à la fin du débat interne joue probablement dans la mise en avant de cette thèse lors du débat collectif. Un autre élément est également à prendre en

considération dans le développement de la thèse C : plusieurs étudiants des groupes 2 et 3 défendent la thèse de non-existence des végétaux relativement tôt au cours du débat. Il s'agit tout d'abord de Laurène (ayant analysé l'article avec Thomas avant cette séance) et Romina (659-664) puis d'Héloïse et Benoît (678, 680). En reformulant à leurs manières et à plusieurs reprises la thèse C, ils jouent le rôle de tiers et contribuent ainsi au développement de cette thèse. À plusieurs reprises, des propos de Manuella indiquent qu'elle n'arrive pas à comprendre que l'on puisse remettre en question l'existence des végétaux.

> « forcément les végétaux existent pour lui on est en 2014 » (668)
>
> « c'est bizarre d'hésiter parce que c'est tellement » (676)

Cependant, à l'issue du débat collectif, la thèse C ne sera pas adoptée par la totalité des étudiants. Le problème de définition d'un groupe en cladistique ne semble donc pas construit par tous les participants. En effet, à la fin du débat (701), Manuella semble à nouveau mobiliser une conception fonctionnelle des végétaux alors que le débat porta sur un article phylogénétique : « ben euh c'est les / c'est les organismes photosynthétiques / après ». C'est sur un désaccord que restera le groupe à la fin de cet épisode (702). La reconstruction didactique qui a été expérimentée avait pour objectif essentiel d'explorer le raisonnement des étudiants. Aussi le professeur n'a volontairement pas tranché cette controverse. Mais dans une perspective d'évolution de la séquence en vue d'une nouvelle mise en œuvre, nous pouvons émettre l'hypothèse de la nécessité d'une intervention de l'enseignant à la fin de cet épisode.

Analyser la dynamique argumentative nous renseigne sur la problématisation mise en œuvre par les étudiants. Les trois thèses avancées par les étudiants permettent d'explorer le champ des possibles en relation avec le problème travaillé. Les objections formulées et le rejet de certaines thèses permettent de délimiter le champ des possibles et d'identifier des nécessités. En l'occurrence la thèse C permet de construire la nécessité d'abandonner le terme de végétal dans le champ de la systématique en relation avec la contrainte théorique de ne définir des groupes qu'*a posteriori* de la construction de la phylogénie.

Nous avons signalé l'importance du rôle de tiers dans la dynamique argumentative joué par plusieurs étudiants, permettant de poser le problème mais aussi de le construire en questionnant la validité des arguments empiriques et théoriques ainsi que leur mise en relation. Mais le professeur assure également ce rôle de plusieurs façons complémentaires : la reformulation, le questionnement et la synthèse. Son mode principal d'intervention est basé sur le questionnement. Ses interventions ont différentes visées (cf. tableau 48). Elles favorisent le lancement du débat par la question initiale, permettant ainsi de poser le problème

à travailler. Beaucoup d'interventions ont pour but d'inciter les étudiants à développer leur argumentation, que cette dernière serve à appuyer une thèse ou à s'y opposer (objection). Ces interventions restent essentielles pour contribuer à l'identification de la thèse, les données sur lesquelles elle s'appuie et l'explicitation des fondements. D'autres questions visent à préciser un problème ou identifier si le problème est résolu.

Formulation de la question initiale
« que sont les végétaux dans cette classification là [après avoir discuté de l'objectif phylogénétique de l'article] ? » (630)
Demande de développement de l'argumentation
« alors ça c'est mentionné en tant que tel ou c'est une inférence que tu fais toi ? » (632) « alors du coup / sur quoi tu t'es basée pour dire organismes photosynthétiques / il y a plastes et cetera / qu'est-ce que t'as fait pour dire ça ? » (640) « et selon les critères qu'il utilise est-ce que ça existe ? » (671)
Énoncé et caractérisation des différentes thèses en présence
« alors faudrait peut être qu'on s'entende / qu'est-ce qu'on met dans cette case / est-ce qu'on met finalement végétaux égal rien / est-ce qu'on met végétaux égal quelque chose / qu'est-ce qu'on fait ? » (648) « donc je laisse le désaccord mais que certains ne veulent pas mettre végétaux qu'il n'y a rien et que d'autres pensent quand même que végétaux / même s'il n'est pas explicité dans la classification existe malgré tout au regard de l'auteur » (702)
Identification d'un consensus
« est-ce qu'au moins vous êtes d'accord tous sur le fait que le groupe ne soit pas mentionné ? » (636) « est-ce que ça c'est quelque chose de consensuel ? » (638)

Tableau 48 : différents types d'interventions du professeur dans le rôle du tiers au cours de l'épisode 23

➢ Importance de l'évolution des méthodes de classification

Comprendre l'évolution des idées à propos de la nature des végétaux dans la systématique implique de percevoir l'évolution des méthodes de classification. Il nous semble important d'identifier quelle perception possèdent les étudiants des spécificités de l'approche cladistique à l'origine d'une rupture majeure de la classification au cours du XX^{e} siècle.

Dans l'épisode 27 relatif à l'article de Burki (cf. annexe, p. 608), il est question de l'usage de données moléculaires en très grand nombre. L'épisode 28 porte sur les méthodes utilisées en phylogénie moléculaire. Il montre une centration importante des étudiants sur la phénétique (827-854), seule méthode qu'ils envisagent pour analyser des données moléculaires, même après les interventions de l'enseignant qui questionne uniquement sur la cladistique (849). Il est nécessaire que le professeur donne à deux reprises l'information de l'utilisation d'un groupe externe (856 et 861) pour qu'une étudiante (862) finisse par formuler leur rôle dans la

polarisation des caractères, étape essentielle à l'analyse cladistique. Nous pouvons penser qu'il s'agit, au moins en partie, de l'effet de l'enseignement de la cladistique qui prend très souvent comme exemple des caractères morpho-anatomiques, alors que la méthode UPGMA (une méthode phénétique) est classiquement enseignée en licence. Mais cette hypothèse n'est probablement pas suffisante car durant la formation précédant la séquence expérimentale, les étudiants ont étudié des exemples d'utilisation de données moléculaires en cladistique. Il nous semble que la difficulté pourrait être principalement liée à un déficit dans la compréhension des fondements épistémologiques de la méthode cladistique, difficile à comprendre pour les étudiants.

Malgré la discussion sur la cladistique à la fin du premier débat collectif, de nouvelles difficultés seront rencontrées par les étudiants lors du second débat collectif (cf. transcription en annexe, p. 580). Au cours de la discussion visant à caractériser la démarche mise en œuvre par Whittaker, Valentino met en avant la cladistique comme condition de possibilité théorique de la classification de Whittaker (930-934). Comment comprendre cette erreur ? L'hypothèse la plus vraisemblable semble être une incompréhension de la signification de ce qu'est une condition de possibilité. En effet, dans la frise chronologique distribuée, la cladistique est placée en 1965, soit quatre ans avant l'article de Whittaker. Cette hypothèse se confirme par la question de Valentino « c'est tout ce qu'il utilise ou c'est tout ce qui est à sa disposition ? » (951). Cet extrait est intéressant car il montre qu'à la question « qu'est-ce que la cladistique ? », l'enseignant obtient cette fois une réponse immédiate de Manuella (936), qui semble indiquer un effet positif de la première discussion lors de l'épisode 28. Mais l'intervention de Aude (939) révèle une incompréhension importante, concernant la notion de polarisation. En effet, lorsque le professeur demande si Whittaker a polarisé les caractères utilisés, Aude répond, en chuchotant dans son groupe de travail : « absence de noyau présence de noyau ». Elle assimile alors polarisation[173] des caractères avec un codage absence - présence. Cela constitue un nouvel indice du déficit de compréhension de la méthode cladistique.

Concernant la méthode de classification mise en œuvre par Cavalier-Smith, les étudiants proposent la cladistique (Valérie, 1012) ou la cladistique et phénétique (Helena, 1014), faisant

[173] Rappelons ici les raisons de la polarisation des caractères. « Au sein de l'homologie, Hennig distingue en effet radicalement deux composantes. Dans une perspective évolutionniste, deux taxons quelconques peuvent présenter des caractères homologues pour deux raisons distinctes. Soit les caractères homologues proviennent d'un ancêtre commun lointain et non exclusif, soit, au contraire, ils proviennent d'un ancêtre commun proche et exclusif. Hennig démontre formellement – et il est le premier à le faire – que l'existence de caractères *dérivés partagés*, c'est-à-dire la *synapomorphie*, exprime l'apparentement de façon précise et non ambiguë. La synapomorphie démontre en effet que deux taxons donnés sont en situation de taxons-frères parce qu'ils tiennent cette spécialisation partagée d'un ancêtre commun proche et exclusif » (de Ricqlès, 1996, p. 7)

alors une association de deux termes correspondant à des méthodes différentes. Ces réponses montrent, là-encore, les difficultés rencontrées par les étudiants pour caractériser une méthode de classification. Les étudiants identifient difficilement les différences théoriques et méthodologiques entre la cladistique, la phénétique et les méthodes mises en œuvre dans le cadre de la systématique évolutionniste (Cavalier-Smith).

Mais le questionnement de l'enseignant permettra de remobiliser les caractéristiques de la cladistique discutées précédemment à plusieurs reprises, les étudiants finiront par invalider le recours à une méthode cladistique par Cavalier-Smith. Romina indique que « lui il part du principe que si c'est cellulaire euh on a l'impression que c'est homologue » (1035), mais sans pour autant le démontrer.

Si les étudiants semblent montrer un déficit épistémologique concernant les fondements des classifications notamment les spécificités de la cladistique, comment perçoivent-ils la rigueur scientifique des méthodes mises en œuvre par Whittaker et Cavalier-Smith ?

L'impossibilité de caractériser précisément la méthode de construction de l'arbre proposé par chaque auteur conduit les étudiants à qualifier ainsi les approches des deux auteurs.

> « il (Whittaker) cherche à faire des liens de parenté faite avec les moyens du bord » (Valentino, Pierrik, 234-236)
>
> « il ressemble à rien (l'arbre de Cavalier-Smith) / c'est des cases avec des flèches » (Pierrik, 1131)
>
> « il a fait ça au feeling » (Valentino, 1141)

Cela semble un pas important vers la reconnaissance de la scientificité des démarches de classification basées sur l'analyse cladistique, comme l'explique G. Lecointre (2009a)[174].

De même, la confusion entre les différents types d'arbre est facile. En effet, pour Aude, Cavalier-Smith a fait figurer sur les branches de l'arbre « les acquisitions quand même » (1139), ce qui laisserait penser à des cladogrammes avec les synapomorphies placées sur les branches.

Enfin, indiquons qu'il n'est pas aisé de réaliser l'analyse d'un article scientifique sans tomber dans une histoire des sciences « jugée » à la lumière des connaissances actuelles ou sans critiquer le scientifique en tant que personne. Ainsi à la fin du débat concernant l'article de Cavalier-Smith, Thomas dit : « (il a fait cela) sur la base de ce qu'il avait on ne peut pas lui en

[174] « L'analyse cladistique, le plus souvent suivie d'une classification phylogénétique, permet de prendre conscience **qu'une classification n'est plus un art qui enferme son praticien dans l'autorité de son expertise, mais une démarche scientifique** qui requiert des postulats, des observations formalisées, transparentes à tout autre classificateur ou utilisateur, des règles du jeu parmi lesquelles l'économie d'hypothèses, des décisions explicites, et, surtout, l'exploration d'un champ des possibles (les différents arbres possibles). En somme, la classification phylogénétique, par l'explicitation qu'elle force, est capable de produire de la connaissance objective, ce qui est le propre des connaissances scientifiques » (Lecointre, 2009a, p. 299), *c'est nous qui soulignons.*

vouloir » (Thomas, 1144), ce à quoi répond le professeur « il est clair qu'on n'est pas dans une optique de lui en vouloir ou pas » (1145). Ce propos semble indiquer que la distance entre critique scientifique et reproche personnel n'est pas facilement perceptible par les étudiants. Nous en discuterons plus avant dans la partie relative à l'image de la nature de la science.

- **Dépendance aux théories et techniques**

Les deux grilles d'analyse des articles comprennent des items permettant d'établir les relations entre la construction des classifications et les techniques et théories mobilisées. La double frise chronologique mise à disposition des étudiants se révèle très utilisée et plusieurs étudiants s'y réfèrent explicitement comme Thomas commentant ci-après ce qu'a utilisé Whittaker.

> « les progrès technologiques ne faisaient pas qu'il avait encore accès à tout ce qui était moléculaire tout ça quand on regarde la frise (…) il est avant / enfin au niveau des théories qui sont en cours / Margulis a parlé de l'endosymbiose l'année avant / la cladistique ça fait quatre ans qu'elle est arrivée / avec Hennig / du coup il a fait ce qu'il pouvait avec les moyens / les moyens qu'il avait » (Thomas, 372)

Nous pouvons remarquer que Thomas cite la cladistique, placée en 1965 dans la frise, qui est antérieure de quatre ans à l'article étudié, bien que non utilisée par R.H. Whittaker. Nous soulignons ici un usage trop rapide de la frise chronologique, basé sur le seul principe d'antériorité. Nous avons déjà eu l'occasion de discuter précédemment le problème de la mauvaise compréhension de l'expression « condition de possibilité » (951). Dans cet extrait, Thomas met en avant l'adéquation entre la classification proposée et les techniques et théories disponibles « il a fait ce qu'il pouvait avec les moyens / les moyens qu'il avait ».

Qu'en est-t-il de la classification de T. Cavalier-Smith ? Le tableau 49 présente l'analyse du débat concernant la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques et le système classificatoire de T. Cavalier-Smith.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
592	Aude C1	ben alors là on voit justement que par rapport à la frise qui nous avait été donnée avec différentes classifications et les avancées technologiques on voit que par rapport à Whittaker il y a eu de nombreuses nouvelles techniques qui sont entrées sur le marché (fait des guillemets avec ses mains) je dis ça comme ça (petit rire) / et que du coup il utilise vraiment ces nouvelles technologies comme la microscopie les microprocesseur analyse moléculaire et séquençage / et qu'en fait du coup c'est une classification qui est en accord avec son temps	Usage de la frise chronologique Référence aux techniques antérieures à la recherche (1981) Microscopie microprocesseur => bioinformatique Séquençage Perception de la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques :

			« avec son temps »
593	Professeur	alors est-ce que lui il a vraiment utilisé analyse moléculaire et séquençage	
594	Aude C1	alors il reconnaît qu'il s'en est servi en partie mais il dit justement que pour / les études à venir il faudra s'intéresser plus aux études moléculaires / il donne déjà des pistes en disant que son étude va pouvoir être affinée par les études moléculaires	Perception de la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques : études à venir / pistes / affiner Études moléculaires
595	Professeur	d'accord / dans les perspectives	Idée que les recherches se poursuivent
596	Aude C1	voilà	
597	Professeur	mais lui par rapport à ce qu'il fait	
609	Héloïse C3	il a utilisé des données de séquences sur le cytochrome C par exemple qui lui a donné des arguments pour confirmer sa classification en cinq règnes / ça concorde ça appuie enfin ça appuie sa classification mais il ne s'est pas basé dessus pour le faire	Utilisation de données de séquences (travaux d'autres auteurs) Confrontation des idées (sa classification) avec d'autres résultats empiriques. Science : aller-retour entre théories et registre empirique
615	Héloïse C3	du coup il est conscient que ce sera probablement une classification à adapter selon les nouvelles données qui vont	Perception de la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques

Tableau 49 : dépendance aux techniques de la classification proposée par Cavalier-Smith (Ep. 21)

Le tableau 49 montre que les étudiants perçoivent la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques dans l'article de Cavalier-Smith. Sont citées ici la microscopie (électronique), le séquençage, la bioinformatique permettant d'analyser les données. Les conclusions de l'article sont replacées dans une perspective temporelle : ce qui existe avant (« disponible sur le marché », 592), ce qu'il fait (« en accord avec son temps », 592) et ce qui sera fait plus tard pour faire évoluer les connaissances (« des pistes en disant que son étude va pouvoir être affinée », 594). Héloïse (609) relève l'importance de la confrontation des idées (les différents règnes proposés) avec d'autres résultats empiriques (les analyses de séquence de cytochrome C réalisées par d'autres biologistes).

Terminons l'analyse par l'article de F. Burki (cf. tableau 50).

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
1222	Professeur	oui dans les possibilités théoriques là pour le coup pas de méthode probabiliste sans qu'il y ait eu de la cladistique antérieurement / donc dans les possibles théoriques cladistique oui // et dans les possibles techniques est-ce que vous voyez des choses qui sont nécessaires	Cladistique : condition de possibilité théorique ayant permis le développement des méthodes probabilistes
1223	Valérie W2	séquençage	séquençage :
1224	Professeur	séquençage oui quoi d'autre ?	
1225	Plusieurs étudiants	PCR	PCR : technique nécessaire à Burki
1226	Professeur	PCR nécessaire c'est sûr	
1227	Manuella B3	microprocesseur	Microprocesseur : ordinateur nécessaire pour le développement de la bioinformatique

1228	Thomas B1	sûrement la bioinformatique pour tout aligner	Bioinformatique : technique nécessaire à Burki
1229	Professeur	la bioinformatique qui est nécessaire pour tout aligner même le traitement qui est fait après des données c'est sûr tout ça ça rentre dedans // d'accord / Est-ce que vous avez identifié d'autres possibles théoriques / d'autres choses qui théoriquement étaient nécessaires	
1230	Valérie W2	ben nous on a mis probabiliste	
1231	Romina C2	on a mis probabiliste	
1232	Professeur	probabiliste c'est sûr / c'est la méthode elle-même finalement donc	
1233	Pierrik W2	la phylogénomique elle date pas d'hier à ce moment là	phylogénomique : déjà disponible en 2014
1234	Professeur	alors phylogénomique est-ce qu'on le met en possible théorique ou technique ?	
1235	Pierrik W2	les deux mon capitaine	À la fois une théorie et une technique
1236	Professeur	c'est un peu les deux à la fois parce que derrière phylogénomique il y a quoi / c'est l'idée d'utiliser beaucoup de caractères donc quelque part cela suppose déjà une réflexion donc quelque part une théorie derrière mais c'est aussi technique puisque le fait d'aligner plein de données comme ça faut pouvoir le faire avec des outils informatiques et autres donc ça rentre un peu dans les deux finalement	Phylogénomique : théorie et technique
1237	Manuella B3	on a remis la théorie de l'endosymbiose mais bon on l'avait déjà vu avant	théorie de l'endosymbiose
1238	Professeur	ouais / ça a pu être remobilisé pourquoi pas / de la même manière qu'il faudrait dire que le darwinisme a été remobilisé aussi / quelque part c'est le cas / dès l'instant où il a de l'évolution un peu sérieuse sous-jacente	Darwinisme

Tableau 50 : dépendance aux techniques et théories de la classification proposée par Burki lors du second débat de synthèse (Ep. 38)

Cet extrait révèle un échange intéressant sur le plan épistémologique qui concerne la distinction entre technique et théorie scientifiques (1234-1236). Pierrik pense que la phylogénomique est à la fois une technique et une théorie (« les deux mon capitaine »). En effet, les techniques très complexes employées en science intègrent nécessairement de nombreux fondements théoriques. Nous rejoignons donc G. Bachelard pour qui : « L'instrument de mesure finit toujours par être une théorie et il faut comprendre que le microscope est un prolongement de l'esprit plutôt que de l'œil » (1938, p. 242).

Analysons maintenant comment l'évolution des idées est intégrée aux cartes conceptuelles ?

- **Apport des cartes conceptuelles à la compréhension des raisons de l'évolution des idées**

➢ **Analyse des raisons de l'évolution des idées mentionnées dans les cartes**

Le tableau 51 synthétise l'analyse globale des treize cartes conceptuelles concernant l'évolution des idées relatives au groupe des végétaux.

	A2	A3	A4	A6	A7	A8	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Nb de cartes	%
Évolution des méthodes de classification	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	**10**	77
Prise en compte de l'homologie (référence explicite dans la carte)	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	**5**	38
Mobilisation de théories (théorie cellulaire, théorie de l'évolution, endosymbiose…)	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	**7**	54
Mobilisation de techniques (microscopie, séquençage, PCR, bioinformatique…)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**13**	100
Manifestation de valeurs, d'idéologies	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	**7**	54
Problème de la place des unicellulaires	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	**5**	38
Prise en compte de la photosynthèse dans la séparation entre champignons et végétaux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	0
Somme des arguments Pourquoi et comment a évolué le groupe des végétaux en systématique ?	**2**	**1**	**3**	**3**	**4**	**5**	**6**	**3**	**2**	**4**	**5**	**5**	**5**	**Moyenne = 3,7**	

Tableau 51 : analyse des cartes conceptuelles concernant les raisons de la rectification du groupe des végétaux entre les trois articles de systématique

Toutes les cartes ont intégré ce thème qui correspond à l'une des deux dimensions de la consigne[175], mais de manière plus ou moins détaillée. Par rapport à notre grille d'analyse, le nombre d'items présents dans les cartes varie de un à six avec une moyenne de 3,7. Dix cartes sur treize (soit 77 %) font référence à l'évolution des méthodes de classification dans l'évolution des idées. Le terme « homologie » apparaît dans cinq cartes sur treize (soit 38 %). Nous avions émis l'hypothèse que l'intégration de l'homologie dans la grille d'analyse des articles constituait une variable didactique permettant de distinguer, d'une part, les classifications fonctionnelle et phylogénétique et, d'autre part, les différentes méthodes utilisées dans le registre phylogénétique selon l'usage de l'homologie (polarisation des caractères ou non). L'analyse précédente a révélé l'importance des débats permis par cet item de la grille mais aussi les difficultés des étudiants concernant l'usage de l'homologie.

[175] Rappel de la consigne : suite aux deux séances précédentes, réaliser une carte conceptuelle des végétaux faisant le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique et expliquant comment et pourquoi ont évolué ces conceptions.

Cependant, seul un tiers des étudiants a remobilisé l'utilisation de l'homologie dans leur carte en lien avec l'évolution des idées. Le tableau 45 analysé précédemment montrait que douze groupes se référaient à la phylogénie. Nous pouvons donc supposer que plusieurs groupes auraient peut-être « encapsulé » l'homologie dans le terme phylogénie, sans l'utiliser explicitement dans la carte. L'étude du processus de construction de la carte apportera probablement des éléments de réponse.

- **Une différence importante du rôle des techniques ou des théories dans l'évolution des idées**

Un résultat est particulièrement frappant. Si la totalité des cartes aborde le rôle des techniques dans l'évolution des idées, la moitié seulement cite le rôle des théories : théorie de l'évolution, théorie de l'origine endosymbiotique des plastes, etc. L'ensemble des propositions relatives aux théories, contexte et cadre de pensée est présentée en annexe (cf. p. 622). Comment interpréter cet important décalage entre l'importance des techniques et des théories pour six groupes sur treize (46 %) ? Nous suggérons plusieurs éléments explicatifs non exclusifs. Il pourrait s'agir de la manifestation d'une posture empiriste accordant une plus grande importance aux observations et aux expérimentations et donc aux techniques plutôt qu'aux théories. Cela pourrait également être lié aux articles qui mettent fortement l'accent sur les données étudiées. Par ailleurs, les trois articles de systématique sont séparés de seulement 45 ans. Les différences théoriques existantes entre eux sont moins marquées que si l'on avait comparé avec une classification du XVIII^{e} siècle, classification antérieure à la théorie cellulaire et la théorie darwinienne de l'évolution. Ainsi le choix des articles étudiés a peut-être un effet sur la moindre mobilisation des théories dans les cartes conceptuelles.

- **Le problème de la place des unicellulaires dans les cartes**

Il faut également noter que le problème de la place des organismes unicellulaires, qui a été essentiel dans la remise en cause de la classification à deux règnes distinguant animaux et végétaux, est faiblement présente : 38 % des cartes. Cet aspect est pourtant bien présent dans l'article de R.H. Whittaker et a été discuté durant le débat collectif.

- **Le problème de la place des champignons : un grand absent dans les cartes**

Si la photosynthèse reste citée dans toutes les cartes, aucune n'établit de relation avec la remise en cause de la présence des champignons parmi les végétaux, ce groupe étant complètement absent des cartes.

Ces résultats semblent indiquer la difficulté à construire une carte conceptuelle dressant à la fois le bilan de la diversité des conceptions des végétaux, selon les différentes classifications actuelles, mais également à travers l'histoire, en cherchant à en dégager les raisons. La complexité de la tâche explique peut-être certains résultats.

- **Analyse des propositions relatives à la phylogénie**

Nous avions identifié précédemment les difficultés des étudiants à percevoir les spécificités de la cladistique. La figure 79 analysée précédemment montrait que dans six cartes sur treize (soit 46%), les étudiants citent nommément la cladistique. Que donne à voir l'étude des propositions incluant des termes du registre phylogénétique ?

Les propositions des treize cartes relatives aux termes ou nœuds lexicaux suivants : homolog/apomorph / monophyletique / polyphyletique / paraphyletique / cladistique / phenetique / probabiliste sont fournies en annexe (cf. p. 622). Si la majorité des groupes utilisent ces termes de manière appropriée, trois cartes sur treize (soit 23 %) montrent une incompréhension majeure sur la méthode utilisée par Cavalier-Smith qui n'est pas cladiste, comme l'indiquent les propositions ci-après.

B5: (Cavalier-Smith) crete mitochondriale synapomorphie plaste

B5: (Cavalier-Smith) monophyletique synapomorphie plaste

A7: cavalier smith 1981 definit paraphyletique

A7: cladistique utilise par cavalier smith 1981

B8: cladistique avancee scientifique cavalier smith

Soulignons enfin que le groupe A3 définit les algues comme un groupe paraphylétique et non polyphylétique, indiquant la difficulté à distinguer ces deux notions.

L'analyse d'articles scientifiques permet de donner à voir certains aspects de l'image de la nature de la science chez les étudiants. Bien que plusieurs aspects relatifs à la nature des savoirs scientifiques aient déjà été abordés dans notre analyse, focalisons nous à présent sur ce thème.

5.2.6. Image de la nature de la science mobilisée par les étudiants

- **L'apport du débat à la compréhension de l'image de la nature de la science des étudiants**

Plusieurs éléments liés à l'image de la nature de la science (NoS) ont été caractérisés précédemment, relativement à la dimension construite d'un concept scientifique et son lien au problème (cf. p. 325) mais également à la dimension provisoire d'un concept scientifique (cf. p. 337). Dans cette partie, nous nous attacherons à deux autres dimensions de la nature de la science : la dimension collective de la science à travers les controverses entre auteurs, ensuite la place des valeurs dans l'activité scientifique. Rappelons que notre objectif n'est pas d'améliorer l'image de la nature de la science des étudiants par notre séquence innovante – il aurait fallu pour cela, avant la séquence, caractériser les connaissances épistémologiques des étudiants. Nous entendons analyser, dans une visée compréhensive, ce que le travail historique basé sur des articles scientifiques produit au niveau de l'image de la nature de la science des étudiants.

Nous étudierons successivement le rôle des controverses entre auteurs et la dimension collective de la science puis la place des valeurs dans l'activité scientifique, avant de dresser un bilan global sur le thème de la NoS travaillé au cours de notre reconstruction didactique.

- **Controverses entre auteurs et dimension collective de la science**

Un item spécifique de la première grille d'analyse des articles porte sur l'opposition à des classifications antérieures. Il permet de focaliser sur les controverses scientifiques, rendant particulièrement visible l'argumentation scientifique tout en facilitant l'identification des raisons de chaque classification. Mais les controverses étant centrales dans l'activité scientifique, leur compréhension est importante dans une perspective épistémologique.

Les étudiants identifient facilement l'opposition de Whittaker à la classification à deux règnes, aidés en cela par une partie clairement identifiée dans l'article « Limitations of the Two-Kingdom System ». Cela permet de travailler le problème historique de la place des organismes unicellulaires ayant des caractères à la fois animaux et végétaux, comme l'indique Valérie (319) avançant des arguments factuels :

> « végétal c'était quelque chose qui était photosynthétique et fixé / et animal c'était mobile et qui ingérait de la nourriture du coup les unicellulaires il y en a qui ont des flagelles et qui sont photosynthétiques donc **ça rentrait ni dans l'un ni dans l'autre enfin c'était un peu des deux du coup il disait on ne pouvait pas intégrer les unicellulaires dans cette classification** »

Les raisons de l'opposition à la classification à quatre règnes sont moins facilement identifiées, mais après discussion, il apparaît que : « il n'y a pas l'aspect nutritif qui a été pris en compte » (Benoît 335) « et il y a une histoire d'organisation cellulaire aussi » (Marina 336). Les raisons de la critique du groupe des Protoctista de Copeland (portant sur le caractère imprécis du degré de différenciation tissulaire) ne sont donc pas clairement perçues, tout comme semble l'indiquer la formulation approximative de Marina « une histoire de… ».
L'identification de ces controverses contribue à mieux appréhender les intentions de l'auteur, comme l'indique Florent (340)

> « bah déjà il a défini par rapport à tout ce qui était unicellulaires pluricellulaires et après il a justifié après tout ce qui est mode de nutrition du fait que ce soit plus facile à classer que les anciennes classifications / **les anciennes classifications elles avaient des problèmes sur plusieurs espèces et avec le mode de nutrition il est sûr de pouvoir classer ces espèces** »

Concernant T. Cavalier-Smith, les étudiants ont perçu clairement la critique que cet auteur adresse à Whittaker et Margulis, critique particulièrement explicite dans l'article.

> « les critères taxonomiques de Whittaker et Margulis qui sont basés sur des critères écologiques d'après lui / ça forme trop de groupes polyphylétiques » (Evelyne 536 538)

Cavalier-Smith s'oppose à plusieurs autres classifications. Les étudiants ne parviennent pas à identifier clairement les raisons de l'opposition[176], comme l'indique les échanges du tableau 52.

N°	Locuteur	Verbatim
541	Professeur	OK / est-ce que vous y avez vu d'autres oppositions à d'autres systèmes antérieurs ou d'autres problèmes qui est évoqués ?
542	Evelyne C2	à celui de Dodson aussi à deux règnes il s'oppose à celle-là aussi
543	Professeur	d'accord
544	Aude C1	à celui de Jeffrey et Edwards où là les euglènes sont pris dans les plantes
545	Professeur	oui / d'accord et quel était son argument en faveur de ça ? // en quoi c'était problématique que ce soit pris dans les plantes est-ce qu'il évoque ça quelque part ?
546	Aude C1	**euh / attendez / parce que euh (silence) parce qu'avec il mettait aussi des eufungi et euh (silence)**
547	Professeur	**si c'est pas clair c'est pas clair hein**

Tableau 52 : extraits concernant les oppositions entre Cavalier-Smith et les classifications antérieures

Mais la différence de perception des deux types de controverse doit être mise en regard de l'inégale importance qu'elles prennent dans la justification du nouveau système proposé par l'auteur. Concernant l'article de F. Burki, les étudiants relevèrent des oppositions d'une

[176] « Jeffrey's five-kingdom and Edwards' seven-kingdom system however both contain taxa that **seem heterogeneous when the characters used in the present classification are considered**: they both include Euglenids with the green plants, chytrids with the Eufungi, dinoflagellates and cryptophytes with the Chromophyta, and Protozoa with the Animalia » (Cavalier-Smith, 1981, p. 471).

nature différente, indiquant un désaccord concernant les valeurs gradistes mobilisées par les classifications antérieures.

> « il remet aussi en cause la / la classification des protistes comme organismes simples par Haeckel / parce que il dit que cela induit **une pensée gradiste dans le sens où il y aurait des organismes simples et complexes** » (Thomas 788)
>
> « moi je dirais qu'il utilise le terme de **super groupe au lieu de règne** (…) et règne je trouve que ça a une **connotation de dominance** » (Aude, 1271-1273)

- **Place des valeurs dans l'activité scientifique**

L'activité scientifique est une entreprise rationnelle mais également une construction sociale, influencée notamment par des idéologies, comme l'affirment M.P. Jiménez-Aleixandre & S. Erduran (2008)[177]. Contrairement aux conceptions communes, Douglas Allchin nous rappelle que la science n'est pas dénuée de valeurs. Il distingue les valeurs épistémiques et culturelles[178]. Les valeurs épistémiques guident la recherche scientifique elle-même. D. Allchin cite notamment les valeurs de désintéressement, de scepticisme organisé, d'universalisme ou de communisme (caractère du bien public des savoirs scientifiques), qui font référence aux travaux de sociologie des sciences de R.K. Merton (1942/1973, cité par Allchin, 1999., p. 2). Les valeurs culturelles s'immiscent également dans la science, consciemment ou non. Il s'agit par exemple des préjugés d'inégalité raciale ou sexiste[179].

Si notre axe principal de recherche concernant la NoS est d'ordre épistémologique en lien avec la nature des savoirs scientifiques et leur élaboration, la réflexion autour des valeurs mobilisées par les scientifiques renvoie davantage à « la dimension humaine et sociale des sciences » (Maurines *et al.*, 2013, p. 22).

La seconde grille d'analyse des articles utilisée lors de la synthèse des trois articles de systématique inclut un item nommé « Idéologie - valeurs sous-jacentes ». D'autres aspects intéressants sont également apparus de manière « émergente » au cours du débat.

- **La subjectivité du chercheur**

[177] « We (the authors of this chapter) contemplate science both as a rational enterprise and as a social construction. There is no denying that scientific research is influenced by ideology, power or commercial interests »(Jiménez-Aleixandre & Erduran, 2008, p. 10).

[178] « First, science does express a wealth of epistemic values and inevitably incorporates cultural values in practice » (Allchin, 1999, p. 1).

[179] « More deeply, however, the conclusions of science at many times and in many places have been strongly biased, reflecting the values of its practitioners (in striking contrast to Merton's norm of universalism). For example, late 19th-century notions of the evolution of humans developed by Europeans claimed that the skulls and posture of European races were more developed than 'Negroes' (Gould 1981). (…) Facts were shaped to fit preexisting judgments and values about race. Likewise, female skulls, skeletal anatomy and physiology were taken by male scientists as evidence of women's 'natural' role in society. The 'scientific' conclusions, which reflected the values of the men, were taken to legitimate social relations that continued to privilege males (Fee 1979; Schiebinger 1990; Smith-Rosenberg and Rosenberg 1973). Perhaps such values should not enter science, but they do » (Allchin, 1999, p. 4).

L'attachement de R.H. Whittaker à des critères écologiques (le mode de nutrition et la place dans le cycle de la matière) est perçu par les étudiants comme un signe de subjectivité et le fruit d'un parti-pris lié à sa discipline. Le propos de Thomas taxant l'auteur « d'écolocentré » est éloquent :

> « il a choisi les caractères qu'il étudiait et il s'est basé sur ceux qu'il connaissait le mieux ou ceux qui pour lui enfin il y a quand même un jugement de valeur entre guillemets parce qu'il a choisi les critères de modes de nutrition donc plutôt écolocentré on va dire et du coup elle est quand même orientée » (Thomas 220)

Dans un autre épisode du débat portant sur la méthode de classification (épisode 14), Aude puis Thomas remettent en cause l'idée qu'il puisse se servir de nouvelles techniques, quand bien même elles eurent été disponibles, en raison de sa préoccupation écologique (tableau 53).

N°	Locuteur	Verbatim
372	Thomas B1	oui les progrès / ouais les progrès technologiques ne faisaient pas qu'il avait encore accès à tout ce qui était moléculaire tout ça quand on regarde la frise que nous a donné Robin il est avant / enfin au niveau des théories qui sont en cours / Margulis a parlé de l'endosymbiose l'année avant / la cladistique ça fait quatre ans qu'elle est arrivée / avec Hennig / du coup il a fait ce qu'il pouvait avec les moyens / les moyens qu'il avait
373	Aude C1	(chuchotant dans son groupe) **en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait vraiment servi de ça**
374	Professeur	d'accord
375	Thomas B1	mais après oui la question elle est pas bête **en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait vraiment servi de ça** / on ne sait pas
376	Professeur	d'accord OK / écologiste
377	Chercheur	en tant qu'écologiste il y a un parti-pris c'est ça ?
378	Aude C1	en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait vraiment servi de ces données là
379	Florent W1	après on n'est pas sûr
380	Aude C1	lui il est plus sur un autre / plus physiologiste / plus sur comment fonctionne de
381	Professeur	alors quelle question vous vous posez par ça ? par le fait qu'en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait posé la question
382	Aude C1	**est-ce que c'est vraiment ce qui l'intéresse en fait** / (quelques mots non audibles) le fonctionnement des organismes
383	Professeur	d'accord vous voulez dire qu'il se serait **centré sur ses propres préoccupations**
384	Aude C1	ouais / enfin après j'ai pas lu l'article mais c'est comme ça que je l'ai compris

Tableau 53 : extraits relatifs au parti-pris de R. H. Whittaker

Lors du second débat (épisode 33), il est à nouveau question de son parti-pris d'écologue. Ce serait un « jugement de valeurs », « qui est lié à son statut d'écologue » (988-989). Ce résultat pourrait indiquer la conscience que la science ne peut pas être « neutre » et qu'un modèle (ici le système classificatoire de R. H. Whittaker) est nécessairement orienté par des choix théoriques. Pour reprendre la typologie proposée par D. Allchin, ce type de valeurs nous semble correspondre au volet épistémique puisque l'influence théorique oriente les travaux.

- **La science, une activité humaine**

L'article de T. Cavalier-Smith donne aux étudiants l'impression qu'il est animé par des ambitions personnelles (tableau 54). Il serait motivé par la « volonté d'être révolutionnaire » (1174), « l'envie de s'illustrer » (1178), à tel point que pour Valentino, faisant probablement de l'humour, « il veut être le Darwin » (1181).

N°	Locuteur	Verbatim
1170	Thomas B1	après / après au niveau des valeurs / enfin je sais pas si des valeurs sous-jacentes mais j'ai le sentiment après si je dis une bêtise c'est pareil vous m'arrêtez mais qu'il y a **une volonté pas de révolutionner** mais / il veut aller plus loin que les observations cellulaires il parle vraiment de
1171	Valentino W1	il critique tout ce qu'il y a avant
1172	Thomas B1	il critique **vraiment les autres / classifications**
1173	Valentino W1	**très très fort**
1174	Thomas B1	genre les deux règnes les quatre règnes **il les dézingue** / du coup enfin pareil a une **volonté d'être révolutionnaire** en incluant les données moléculaires / enfin il aimerait que ce soit utilisé en plus plus tard dans le futur
1175	Professeur	est-ce que tu veux dire par là qu'il a des volontés un petit peu personnelles des **ambitions personnelles** ou est-ce que tu veux juste dire que [
1176	Helena B1	**ah oui**
1177	Valentino W1	**ouais peut-être**
1178	Aude C1	si **il a envie de s'illustrer**]
1179	Professeur	qu'est-ce que tu sous-entends par là / est-ce que c'est quelque chose qui serait casser pour casser
1180	Thomas B1	non pas casser pour casser il veut changer / il veut modifier
1181	Valentino W1	**il veut être le Darwin**

Tableau 54 : extraits du débat relatif aux ambitions personnelles de Cavalier-Smith

Il est intéressant de noter que cet extrait fait écho à des analyses qualifiant Cavalier-Smith d'arrogant[180], indiquant que la perception des étudiants à partir de ce seul article semble partagée par d'autres analyses.

La science semble donc perçue comme une activité humaine mue par des scientifiques dont l'activité peut être orientée par des ambitions personnelles.

[180]« Prof. Cavalier-Smith of Oxford University has produced a large body of work which is well-regarded. **Still, he is controversial in a way that is a bit difficult to describe**. The issue may be one of **writing style.** Cavalier-Smith has a tendency to make pronouncements where others would use declarative sentences, to use declarative sentences where others would express an opinion, and to express opinions where angels would fear to tread. **In addition, he can sound arrogant, reactionary, and even perverse.** On the other, he has **a long history of being right when everyone else was wrong**. To our way of thinking, all of this is overshadowed by one incomparable virtue: the fact that he *will* grapple with the details. This makes for very long, very complex papers and causes all manner of dark murmuring, tearing of hair, and gnashing of teeth among those tasked with trying to explain his views of early life. See, e.g., Zravý (2001); Patterson (1999). Nevertheless, he deals with all of the relevant facts. » Source : http://palaeos.com/eukarya/eukarya_origins_1.html, consulté le 14 novembre 2015, c'est nous qui soulignons.

- **Le gradisme**

Les étudiants ont identifié la mise en jeu d'une pensée gradiste chez R.H. Whittaker et T. Cavalier-Smith. Deux types d'indicateurs sont repérés : la forme de l'arbre et certaines expressions dans le texte comme le terme « supérieur » (« higher »), indiquant l'idée de hiérarchie du vivant (tableau 55). La présence de flèches dans les arbres et de groupes en position d'intermédiaires est identifiée comme représentation du gradisme.

Article de Whittaker		
238	Thomas B1	après tant qu'on était dans le gradisme / il parle quand même de / enfin il mentionne **three highers kingdoms donc il y aurait trois règnes supérieurs** aux autres qui sont les fungi les animaux et les plantae
239	Professeur	d'accord mais est-ce que ça c'est un objectif ou est-ce que c'est finalement quelque chose que vous voyez au travers de
240	Valentino W1	[non c'est involontaire
241	Thomas B1	c'est implicite] enfin **involontaire plus ou moins**
242	Pierrik W2	quand on regarde son **schéma de représentation** il y a un **point de départ** en fait pour lui
243	Valentino W1	oui le point de départ il est chez les procaryotes
Second débat (synthèse)		
959	Valentino W1	bah euh bah le gradisme
960	Professeur	alors ça c'est idéologie d'accord donc idéologie / gradisme est-ce que vous avez vu précisément des choses qui chez Whittaker suggéraient qu'il était gradiste ?
961	Thomas B1	three higher kingdoms
962	Valentino W1	le terme de règne supérieur
963	Thomas B1	règnes **supérieurs**
964	Professeur	ouais **supériorité infériorité**
965	Aude C1	les procaryotes tout en bas
966	Valentino W1	les **flèches** qui partent des procaryotes et **qui vont tout en bas et qui montent**
967	Professeur	donc les flèches / qui tendraient à faire quoi ces flèches
968	Aude C1	montrer l'évolution / montrer l'évolution des organismes
Article de Cavalier-Smith		
1152	Professeur	alors est-ce qu'il y a de l'idéologie et des valeurs là-dessous / sous-jacentes ou pas ?
1153	Aude C1	il y encore un peu de gradisme
1154	Professeur	qui se manifeste sous quelle forme ? est-ce que vous avez vu des indices de gradisme dans ce travail ?
1155	Valentino W1	les **flèches** aussi non ?
1156	Professeur	les flèches alors c'est quoi ces flèches ?
1157	Valentino W1	il y a encore des **flèches**
1158	Aude C1	elles servent à illustrer
1159	Thomas B1	elles induisent un sens
1160	Valentino W1	elles illustrent
1161	Professeur	ouais qui **induisent un sens évolutif**
1162	Aude C1	bah déjà on va **des procaryotes ensuite on monte aux eucaryotes** et voilà il y a des flèches qui montent vers des ajouts
1163	Professeur	d'accord vers des choses qui seraient jugées donc [
1164	Aude C1	**plus évoluées**]
1165	Professeur	**plus évoluées [plus complexes**
1166	Valentino W1	linéaires]

Tableau 55 : le gradisme chez Whittaker et Cavalier-Smith

De manière corrélative, la forme circulaire de l'arbre des eucaryotes chez Burki est interprétée comme l'émancipation de la pensée gradiste. Les étudiants mettent en avant : « la forme de la figure », « le cercle », « ça induit aucun gradisme », « chacun de la même distance du centre » (1238-1256).

- **La question de l'invariance des sciences**

Le professeur interroge les étudiants sur la relation entre science et valeurs : « pour vous est-ce que ça c'est du ressort de la science et pourquoi ? » (969). Thomas répond en introduisant une distinction entre la science actuelle de la science passée : « ça a été du ressort de la science » (970). Florent confirme : « oui à l'époque c'était scientifique » (996). L'enseignant questionne à nouveau « il y a des choses qui sont scientifiques à une époque qu'ils ne sont pas d'autres ? » (998), ce à quoi plusieurs étudiants répondent positivement (Pierrik, Florent, Valentino, Thomas).

Cet extrait est intéressant car il révèle que l'étude historique permet de questionner l'unicité et l'invariance des sciences à travers le temps. La cladistique s'est affranchie de la pensée scaliste et gradiste. Chercher une hiérarchie parmi les êtres vivants reflète une valeur dont se détache la systématique actuelle, et ce de manière relativement récente. Il n'en a donc pas toujours été ainsi, comme nous l'avons montré au chapitre précédent.

Ces résultats indiquent la potentialité didactique de l'histoire des sciences dans le but d'identifier l'implication de valeurs de façon contextualisée[181].

En particulier, cette étude de cas indique qu'un travail historique sur des articles est favorable au repérage des signes d'une pensée gradiste, ce qui constitue un élément essentiel à la construction d'une pensée phylogénétique dépassant des obstacles comme celui du progrès.

Analysons à présent comment l'image de la nature de la science est-elle traitée par les étudiants dans les cartes conceptuelles ?

- **L'apport des cartes conceptuelles à la compréhension de l'image de la science des étudiants**

Sept cartes conceptuelles sur treize (soit 54 %) abordent la question des valeurs et de l'idéologie dans l'évolution des idées (cf. tableau 51). Les propositions suivantes sont extraites des cartes en cherchant les termes (ou nœuds lexicaux) « gradi », « fixi » et religion.

A7: gradisme	utilise par	linne	1735
A7: contexte	theorie soit	gradisme	

[181] « Historical cases offer the advantage that students can clearly see the consequences of certain values, while also seeing how they function in context (e.g., Hagen, Allchin & Singer 1996) »(Allchin 1999, p. 10).

A7: gradisme utilise par cavalier smith 1981
A7: gradisme utilise par whittaker 1969
A8: gradisme influence cavalier smith
A8: gradisme influence whittaker
B2: theorie d endosymbiose gradisme permettant d aboutir classification pseudo cladistique
B2: gradisme permettant d aboutir classification ecologique
B2: autotrophie photosynthese nutrition structure cellulaire moyen technique theorie gradisme
B2: chlorophylle photosynthese structure flagellaire crete mitochondriale moyen technique theorie theorie d endosymbiose gradisme
B3: contexte religion fixiste
B3: contexte religion fixiste
B6: whittaker classification gradisme
B6: fonctionnelle ecologique permis par gradisme
B6: gradisme nombre regne 5 regne
B7: cadre de pensee peut etre fixiste
B8: gradisme influence classification 2 regne
B8: gradisme influence whittaker copeland haeckel
B8: religion influence classification 2 regne

L'influence de la religion est émergente au sens où elle apparaît dans deux cartes (B3 et B8) bien que n'ayant pas été abordée lors du débat. Elle est mise en lien avec un cadre de pensée fixiste et l'établissement de la classification à deux règnes.

L'association entre gradisme et Linné (A7) nous interroge. En effet, le gradisme implique l'évolution des espèces, contrairement à la pensée fixiste de Linné. Mais la conception scaliste du vivant en est le dénominateur commun. Ce constat, bien que limité à un seul binôme, suggère la nécessité de définir explicitement ce qu'est le gradisme lors d'une micro-institutionnalisation, en comparaison avec la pensée fixiste.

Dressons à présent une synthèse de l'ensemble des aspects liés à l'image de la nature de la science qui ont été travaillés lors de la séquence expérimentée.

- **Synthèse des aspects liés à la NoS travaillés dans notre reconstruction didactique**

Maurines et Beaufils (2013, p. 1449) présentent des caractéristiques de l'activité scientifique et de la nature des savoirs scientifiques. Nous proposons de les utiliser afin de synthétiser les différents aspects liés à la NoS qui furent l'objet du débat durant la reconstruction didactique mise en œuvre. Nous reformulons ces caractéristiques, énoncées en anglais par ces deux auteurs.

Caractéristiques de l'activité scientifique et de la nature des savoirs scientifiques	Aspects discutés durant la reconstruction didactique
Un scientifique ne fonctionne pas isolément, mais dans une communauté	• Nécessité de références bibliographiques, appui sur les travaux d'autres auteurs • Statut de revue de l'article de F. Burki : synthèse de recherches réalisées dans la communauté scientifique
Les scientifiques étudient des problèmes différents et adoptent une diversité d'approches et de méthodes pour y répondre	• Diversité des classifications selon les problèmes étudiés (fonctionnel / écologique et phylogénique) • Relation avec les méthodes de classification, les caractères utilisés
L'activité scientifique est au centre de controverses	Remise en cause des classifications antérieures par les différents auteurs, contribuant à rendre saillants les nouveaux arguments mis en avant
Les idées de scientifiques ne sont pas nées dans le vide	Mobilisation des théories antérieures : théorie de l'évolution, endosymbiose, cladistique…
Il existe une relation forte entre les questions techniques et l'évolution des idées	Évolution des classifications prenant en compte de nouveaux caractères cellulaires et biochimiques (Cavalier-Smith), moléculaires et génomiques (Burki), permis par le développement de nouvelles techniques
Les scientifiques soumettent leurs explications à l'épreuve des faits qui résultent de l'observation et des expériences	Nécessité de faire évoluer la classification selon les nouvelles données, notamment liées au séquençage (Cavalier-Smith)
Les scientifiques suivent des critères de cohérence interne, de simplicité et de force (explicative, prédictive, rétrodictive)	*Non débattu durant le débat*, mais les articles auraient pu permettre de discuter notamment du principe de parcimonie[182], de cohérence de la classification
La connaissance scientifique a évolué au fil du temps (par une dialectique de continuité et ruptures)	Évolution des classifications et de la nature du groupe des végétaux selon les systèmes classificatoires. Rupture entre classification fixiste et évolutive et dans une moindre mesure entre classification gradiste et cladiste
L'activité scientifique repose sur des valeurs et des croyances	Gradisme, croyance de l'existence du progrès, de directions évolutives)
L'activité scientifique et le contexte social, politique, économique et culturel sont en interaction	*Aspect non discuté dans cette reconstruction didactique* ne ciblant pas la dimension sociologique des sciences

Tableau 56 : bilan des aspects de la NoS travaillés lors de notre reconstruction didactique, items d'après Maurines et Beaufils (2013)

[182] « En sciences, le principe de parcimonie relève de la mesure de la cohérence des théories générées » (Lecointre 2004, p. 7) « D'une manière générale, une théorie est cohérente lorsque les hypothèses qu'elle implique sont compatibles ou se corroborent entre elles. Plus elles se corroborent et moins il est besoin d'en faire » (2004, p. 11)

Bien que notre objectif principal consiste en l'étude du raisonnement des étudiants concernant les différentes classifications biologiques et la pluralité du concept de végétal, le tableau 56 indique que de nombreux items liés à la NoS sont travaillés dans la reconstruction didactique mise en œuvre. Une formation basée sur une analyse d'articles scientifiques paraît donc propice à un travail centré sur l'image de la nature de la science. Cependant, elle n'a pas fait l'objet d'une institutionnalisation par le professeur en raison de notre choix de laisser vivre au maximum le débat avec le moins d'apports possibles de l'enseignant, ceci de manière à encourager le plus possible la prise de parole des étudiants à des fins d'exploration de leur raisonnement. La recherche de Abd-El-Khalick & Lederman (2000b) sur l'impact d'études historiques sur la NoS souligne l'importance de l'explicitation des différents aspects liés à la NoS dans une perspective d'apprentissage.

> « It seems that HOS [*History of Science*] itself may not suffice to improve learners' views of science. Aspects of NOS that are deemed important for students to understand need to be given explicit attention » (Abd-El-Khalick & Lederman, 2000b, p. 1060).

5.3. Évaluation des choix didactiques et détermination de possibles didactiques (QR2)

L'élaboration d'une séquence d'enseignement-apprentissage impose d'opérer des choix didactiques. Leur évaluation permet de déterminer certains possibles didactiques ou *a contrario* d'en identifier les limites dans le cadre du dispositif mis en œuvre. Cette recherche de faisabilité correspond au second pôle de nos questions de recherche. Elle constitue une étape importante dans le but de faire évoluer la reconstruction didactique pour une nouvelle mise en œuvre. Trois choix didactiques seront évalués successivement. Nous chercherons à examiner tout d'abord si la présentation croisée des articles associée au débat interne à chaque groupe de travail permet l'engagement des étudiants dans le débat collectif pour les deux articles non lus. Ensuite, nous analyserons la pertinence du choix des articles dans le but de travailler la dualité fonctionnelle et évolutive des classifications. Enfin, nous discuterons de la faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais dans le cadre de l'accompagnement proposé.

5.3.1. Engagement dans le débat collectif concernant les deux articles non lus

En raison de l'ampleur du travail que représente la lecture et l'analyse des quatre articles scientifiques en anglais, le choix a été fait de n'en faire lire aux étudiants que deux : l'article (ou plus exactement les deux extraits) d'écologie et l'un des trois articles concernant la

systématique des Eucaryotes. Afin de permettre aux étudiants de s'engager dans le débat collectif sur l'ensemble des articles, plusieurs éléments furent mis en place :

- L'utilisation d'une même grille d'analyse pour tous les articles permettant de s'approprier les différents critères de comparaison
- Un premier temps d'une heure quinze a été consacré à la présentation croisée des articles par groupe de 5 étudiants, elle-même associée à un débat interne à chaque groupe. Cette tâche implique de remplir un tableau synthétique de comparaison des quatre articles.

Est-ce que cette stratégie permet aux étudiants de s'engager dans le débat collectif sur les articles non lus ? La comparaison du nombre de tours de parole par étudiant pour les deux articles lus et pour les deux articles non lus permet de répondre partiellement à la question. Un test Chi2 de conformité permet ensuite de comparer pour chaque étudiant la répartition observée à une répartition théorique équiprobable entre articles lus et non lus. Les résultats sont présentés dans le tableau 57 et de façon graphique dans la figure 83.

Étudiant	**G-S**	**W**	**C**	**B**	**Total**	**Articles lus**	**Articles non lus**	**p-value**	**Significativité du test Chi 2**
Florent W	2	14	4	5	25	16	9	0.1615	NS
Pierrik W	5	18	2	1	26	23	3	8.76e-05	**S**
Marina W	1	4	2	4	11	5	6	0.7630	NS
Valentino W	19	44	4	15	82	63	19	1.17e-06	**S**
Valérie W	1	7	1	3	12	8	4	0.2482	NS
Benoît W	16	5	0	14	35	21	14	0.2367	NS
Aude C	5	5	33	1	44	38	6	1.40e-06	**S**
Héloïse C	9	2	14	13	38	23	15	0.1943	NS
Romina C	0	0	6	3	9	6	3	NA	NA
Evelyne C	6	0	21	0	27	27	0	2.03e-07	**S**
Thomas B	26	23	18	53	120	79	41	0.0005	**S**
Laurène B	7	1	6	15	29	22	7	0.0053	**S**
Manuella B	19	2	4	22	47	41	6	3.30e-07	**S**
Helena B	0	0	0	9	9	9	0	NA	NA
Karima B	0	0	0	0	0	0	0	NA	NA

Légende : G-S : Gasparini – Sabine (écologie) ; W : Whittaker ; C : Cavalier-Smith, B : Burki
S : différence significative ; NS : différence non significative ; NA : valeur manquante (Not Available)
Différence significative si p-value < 0.05

Tableau 57 : nombre de prises de parole par étudiant selon les articles et étude statistique de l'effet de la lecture des articles sur la prise de parole

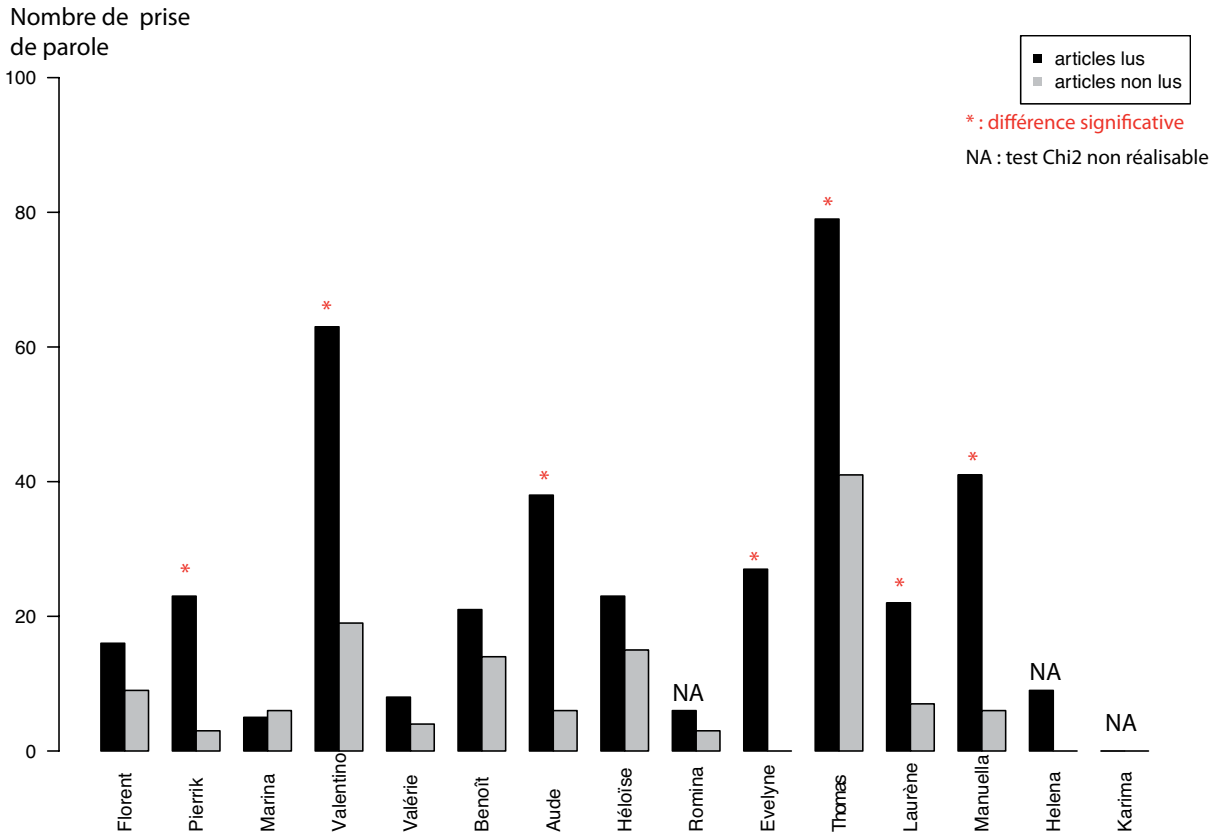


Figure 83 : nombre de prises de parole pour chaque étudiant et selon les articles lus ou non

Le nombre de prises de parole est très différent d'un étudiant à l'autre, de façon globale. Si le nombre moyen d'interventions par étudiant est de 34, il s'élève à 120 pour Thomas et est inférieur à 10 pour cinq étudiants. Ainsi au-delà de la lecture ou non des articles, le premier facteur d'engagement dans le débat collectif semble donc d'abord lié à la personnalité des étudiants. Soulignons que le test Chi2 n'est pas réalisable pour trois étudiantes (Romina, Helena et Karima), expliquant l'absence de p-value (valeur manquante NA). En effet, une condition d'application du test est que l'effectif théorique de chaque classe soit au minimum de cinq. Au risque de 5 %, nous pouvons affirmer que sept étudiants ont une différence significative du nombre de prises de parole entre les articles lus et les articles non lus. Ils interviennent donc plus sur des articles lus. À partir de cette seule étude quantitative, il n'est pas possible d'expliquer les raisons de cette différence. Nous pouvons supposer que ces étudiants se sentent peut-être plus « légitimes » pour intervenir dans le débat concernant les articles qu'ils ont lus. Maîtrisant plus en détail ces articles, il est envisageable qu'ils interviennent davantage lors du débat pour cette raison.

Cependant, pour cinq autres étudiants, il n'y a pas de différence significative : ils interviennent autant pour les articles lus et non lus. Les résultats de cette étude quantitative

sont donc contrastés quant à l'engagement des étudiants dans le débat collectif en fonction du type d'articles, lus ou non. Ainsi la situation didactique proposée permet aux étudiants d'intervenir sur les articles non lus, mais dans des proportions semblables ou non à celles des articles lus.

Cette étude basée sur le nombre de prises de parole au cours du débat présente d'importantes limites et ne constitue qu'un indicateur partiel. Le nombre d'interventions ne préjuge pas de la qualité de l'argumentation développée. De plus, certains étudiants participent peu au débat collectif, mais sont très attentifs et participent intellectuellement à la séance de manière active bien que discrète. Nous étudierons en détail le cas de Helena, qui n'intervient que neuf fois au cours du débat collectif, par l'analyse de la construction de la carte conceptuelle réalisée en binôme avec Manuella. De manière plus qualitative, nous avons noté, qu'au cours du débat collectif, des étudiants participent de manière active en proposant des arguments nouveaux sur des articles qu'ils n'ont pas lus. Ils nuancent alors leur propos par une modalisation appréciative en indiquant qu'ils n'ont pas lu l'article en question. Il s'agit par exemple d'Aude lors de l'épisode 14. Celle-ci pense que R. H. Whittaker ne se serait pas servi de nouvelles données (moléculaires par exemple) en raison de sa centration sur des problèmes écologiques : « en tant qu'écologiste est-ce qui se serait vraiment servi de ça » (373 et 378). Mais un peu plus tard, elle nuancera en rappelant : « enfin après j'ai pas lu l'article mais c'est comme ça que je l'ai compris » (384). De la même manière, lors de l'épisode 36 relatif à l'article de T. Cavalier-Smith, Thomas avance que pour cet auteur « c'est mieux d'utiliser les données moléculaires » (1182) et « il a l'air de dire que c'est plus cohérent scientifiquement » (1186) et « c'est plus rigoureux quoi » (1188). Mais au cours de son argumentation, Thomas précisera cependant : « j'sais pas j'ai pas lu le texte mais » (1184).

Ces deux exemples concernent deux participants, Aude et Thomas, pour lesquels la différence du nombre d'interventions était significative entre articles lus et non lus (cf. figure 83). Pour autant, il apparaît que leurs interventions sur les articles non lus sont qualitativement importantes, ce qui constitue un élément positif d'évaluation de la situation didactique proposé.

Une autre manière d'évaluer si la première activité de la séance (présentation croisée des articles, débat interne au groupe et remplissage d'un tableau de comparaison) permet aux étudiants de s'engager dans le débat collectif pour les articles non lus serait de questionner explicitement les étudiants. Un rapide questionnaire réalisé après la séance permettrait, en effet, de recueillir leur impression concernant l'efficacité de la première activité de la séance,

et apporterait un éclairage complémentaire à notre analyse. Mais, malheureusement, cette piste d'évaluation de notre choix didactique n'a été envisagée que trop tardivement.

5.3.2. Pertinence du choix des articles

Le choix des articles scientifiques constitue une variable didactique essentielle dans la reconstruction didactique. Il est donc essentiel d'évaluer la pertinence de ce choix. Nous étudierons tout d'abord le nombre de citations de chaque auteur dans les cartes conceptuelles. Bien évidemment, il ne s'agit que d'un indicateur partiel, mais une éventuelle différence pourrait retenir notre attention. Une étude qualitative des difficultés émergentes liées aux articles permettra d'éclairer de façon plus approfondie la question de la pertinence du choix des articles.

- **Citation des articles dans les cartes conceptuelles**

La figure 84 recense la citation explicite des auteurs étudiés dans les treize cartes conceptuelles.

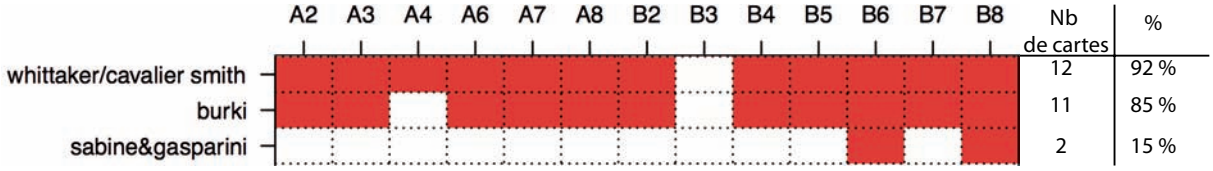


Figure 84 : citation des quatre articles dans les treize cartes conceptuelles. Whittaker et Cavalier-Smith sont regroupés car cités dans les mêmes cartes. En rouge : présence dans la carte.

Les trois auteurs des articles consacrés à la systématique des Eucaryotes sont très fortement cités. Whittaker et Cavalier-Smith sont nommés dans douze cartes et Burki dans onze cartes sur treize. Par contre, les auteurs des deux extraits d'articles d'écologie - Gasparini ; Sabine - ne sont cités que par deux cartes sur treize. Comment expliquer cette frappante différence ?

- **Identification de difficultés non prévues concernant les extraits d'articles d'écologie de Gasparini et Sabine**

Le tableau 58 présente une analyse d'extraits du débat collectif concernant la distinction réalisée par plusieurs étudiants entre les activités de définition et de classification et la source encyclopédique des articles d'écologie.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
Épisode 2 (objectifs de la classification)			
5	Pierrik W2	bah en fait **il s'attarde pas sur les végétaux** ce texte il s'attarde sur le phytoplancton en fait	Les végétaux ne sont pas l'objet premier de l'extrait 1 portant sur le phytoplancton
41	Pierrik W2	c'est juste **une définition** que donne une encyclopédie un cours approfondi	Juste : modalisation appréciative Opposition entre la **définition** et la **classification**. Souligne que l'extrait est issu d'une encyclopédie qui a le statut d'un « cours approfondi », non équivalent à celui des articles scientifiques
Épisode 7 (méthode de classification)			
126	Thomas B1	**il ne fait pas de classification en tant que tel** enfin / quand on compare puisqu'on a trois autres articles où là vraiment il y a des classifications **là on peut pas dire vraiment qu'il y a une classification il y a une définition du phytoplancton** / il y a la mention du caractère photosynthétique dans le cycle du carbone qui est important et qui serait effectué par les végétaux mais **est-ce qu'on peut parler de classification ?**	**Position similaire à Pierrik** Comparaison aux autres articles dont l'objet premier est de réaliser une classification contrairement aux articles d'écologie Opposition entre la **définition** et la **classification**. Position moins affirmative que précédemment : doute ?
Épisode 29 (Synthèse sur les deux grands types de classification à la fin de la première partie du débat collectif)			
878	Professeur	et l'autre c'était quoi Gasparini ça répondait à quel problème ?	Question visant à caractériser le problème travaillé dans la classification écologique
879	Thomas B1	des **problèmes de définition** / il veut **définir**	**Définition** et non classification
880	Romina C2	bah **définition** écologique	Reprise de l'idée de **définition**
881	Professeur	**définition** écologique / donc ça répondait plus au problème qui n'est pas dans le registre des liens de parenté mais qui était plus	Le professeur institutionnalise le problème écologique mais **en laissant de côté la distinction entre définition et classification**
882	Valentino W1	c'était plus fonctionnel	
883	Professeur	oui c'était plus fonctionnel quelque part	
884	Valentino W1	la **classification** fonctionnelle	Retour au terme **classification**
885	Thomas B1	mais après ça se voit aussi / enfin Gasparini c'est un article d'encyclopédie / badapap (onomatopée) pardon/ dans une encyclopédie on essaie de mettre une définition de la chose alors que les autres c'est des articles scientifiques	Justification de l'activité de définition par le statut de la source étudiée : article d'encyclopédie contrairement aux autres articles scientifiques
886	Professeur	ça reste de l'article scientifique mais est-ce que la classification telle qu'elle était évoquée dans les articles répondait au même problème finalement ?	Le professeur ne creuse pas la distinction entre article d'encyclopédie et article scientifique pour se centrer sur l'item travaillé, à savoir le type de problème fondant la classification

Tableau 58 : extraits du débat relatif aux articles d'écologie, en particulier celui de Gasparini

À plusieurs reprises est avancée l'idée que Gasparini ne réalise pas de classification mais cherche seulement à définir le plancton. Une opposition est donc pointée entre les activités de définition et de classification. Pierrik et Thomas établissent un lien avec la nature encyclopédique de la source de l'article, de manière persistante (au début du débat comme à la fin).

> « c'est juste **une définition** que donne une encyclopédie un cours approfondi » (Pierrik, 41)
>
> « enfin Gasparini c'est un article d'encyclopédie (…) dans une encyclopédie on essaie de mettre une **définition** de la chose alors que les autres c'est des articles scientifiques » (Thomas, 885)

Nous émettons donc une grande réserve quant au choix d'une source encyclopédique focalisant plusieurs étudiants sur un aspect qui n'est pas notre objectif de séquence, à savoir la différence entre un article paru dans un journal scientifique ou dans une encyclopédie. De plus, le fait d'avoir proposé aux étudiants un extrait et non l'article entier marque une différence avec les trois autres articles. Les citations suivantes indiquent que les étudiants pointent la faible longueur de l'extrait ainsi que le manque de références bibliographiques lors de la discussion sur l'usage de l'homologie dans la classification :

> « c'est pas explicite je pense que le texte n'est pas assez long pour le coup on ne sait pas s'il a voulu expliquer cette dimension-là » (Benoît, 106)
>
> « soit il est pas assez long soit on n'a pas les références sur lesquelles il s'est appuyé pour dire ça » (Thomas, 109)

Dans l'optique de l'évolution de la séquence, nous suggérons donc de ne retenir que des articles scientifiques entiers afin de ne pas introduire de différences entre des articles écologique et évolutif.

Par ailleurs, une autre différence est identifiée entre les articles d'écologie et les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes, sans être forcément reliée à la nature encyclopédique de la source.

> « il ne fait pas de classification en tant que tel enfin / **quand on compare puisqu'on a trois autres articles où là vraiment il y a des classifications** là on peut pas dire vraiment qu'il y a une classification il y a une définition du phytoplancton » (Thomas, 126).

Dans les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes, la classification est l'objet de l'article alors que dans les articles écologiques, la classification n'est pas nécessairement explicite et constitue un outil et non l'objet premier de l'étude. Ainsi dans l'article de Sabine, l'objet d'étude est le flux de carbone et les végétaux, au sens fonctionnel, ne sont pas envisagés pour eux-mêmes mais pour leur rôle dans le transfert du carbone d'un réservoir à l'autre. Cette différence nous semble renvoyer à la dialectique outil – objet d'un concept

(Douady, 1986). La dimension objet de la classification est clairement perçue car explicite alors que la dimension outil, implicite, reste moins évidente à percevoir pour les étudiants. La classification du plancton en deux groupes fonctionnels (phytoplancton et zooplancton) que propose Gasparini pose question aux étudiants : répond-elle à une activité classificatoire ou bien à celle de tri ? L'épisode 7 portant sur la méthode de classification de Gasparini et Sabine (126-189) est révélateur des difficultés à distinguer les deux types d'activités (cf. tableau 59).

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
Article de Gasparini (plancton)			
133	Benoît W3	il y a une envie de classer ça c'est sûr de regrouper des organismes **mais mais** est-ce qu'on peut parler d'une classification **là je je sais pas**	Question posée : l'activité de regroupement suffit-elle à parler de classification ? **Doute**
134	Professeur	alors c'est quoi une classification ?	Réitération de la question sur la classification posée en 127
135	Valentino W1	c'est classer	Réponse à la question du professeur sur une définition formelle de la classification qui résulte de l'activité de classement
136	Manuella B3	c'est **regrouper** les organismes en fonction de certains [caractères	Répond ainsi à Benoît : classer c'est **regrouper** en fonction de caractères
137	Valentino W1	c'est **agglomérer**]	Dimension **agglomérative** de la classification (logique ascendante)
138	Manuella B3	donc là effectivement oui	
139	Professeur	oui donc va regrouper oui / est-ce qu'il y a quelque part là dedans	
140	Valentino W1	c'est plus **trier** en fait	**Opposition** : Valentino pense que dans l'article sur le plancton, il s'agirait plus d'un tri que d'une classification
141	Professeur	est-ce que c'est trier ? est-ce qu'il y a un regroupement ou pas ?	Question visant à trancher la controverse : y a-t-il dans l'article un tri ou un regroupement (sous-entendu une classification) ?
142	Manuella B3	un peu oui / pour les phytoplanctons oui	Réponse pas claire car il y avait deux propositions dans la question de l'enseignant (trier ou regrouper) : oui à quelle proposition ?
143	Evelyne C2	bah oui [il y a séparation	Séparation donc tri ? (interprétation hypothétique)
144	Benoît W3	bah **c'est regrouper** quand même] / pour cette table on s'accorde à dire qu'il y a quand même qu'il y a un regroupement quand même [des phytoplanctons des zooplanctons	**Prise de position pour le groupe 3 : il y a regroupement d'organismes** au sein des catégories phytoplancton et zooplancton
145	Manuella B3	plancton **photosynthétique** phytoplancton] et **non photosynthétique** [zooplancton	Mise en avant de la **photosynthèse** comme le caractère utilisé pour distinguer phyto et zooplancton [mais sans expliciter la logique associée à ce caractère : tri ou classement ?]

146	Professeur	donc il y a] des regroupements / qui [sont faits	
147	Manuella B3	pour moi oui]	Dans une logique de regroupement pour Manuella
(…) Passage à l'article de Sabine (cycle du carbone)			
171	Professeur	est-ce que c'est une classification ou pas ?	Réitération de la question sur la classification posée en 127 et 134
172	Evelyne C2	si on utilise le **critère / enfin la fonction comme un critère de regroupement oui**	**Prise de position : regrouper selon un critère, c'est classer**
173	Professeur	partant du principe qu'il y a un critère pour regrouper	
174	Evelyne C2	ou différencier enfin je veux dire c'est pas forcément / **on peut diviser aussi**	Deux interprétations hypothétiques : - la classification peut procéder aussi d'une **logique divisive** - ou un critère donné peut être utilisé aussi pour diviser (logique de tri)
175	Professeur	est-ce que diviser c'est la même logique ? est-ce que c'est pareil diviser / est-ce qu'on peut classer en divisant	
176	Benoît W3	pas pour moi (en chuchotant)	Prise de position : classer = regrouper uniquement et pas diviser
177	Valentino W1	non / classer c'est **l'agglomération** plutôt	Même avis : classer = logique agglomérative
178	Marina W3	non parce que classer c'est regrouper donc	Même avis : classer = regrouper
179	Professeur	donc je repose ma question désolé mais c'est pour que ce soit bien clair est-ce qu'il y a du regroupement quel qu'il soit dans ces deux articles ?	Réitération de la question sur la mise en jeu d'une logique agglomérative de regroupement dans les articles d'écologie
180	Thomas B1	**au sein du phytoplancton oui** puisqu'il dit qu'il y a les diatomées il dit que c'est des algues unicellulaires il dit qu'il y a des bactéries et cyanobactéries mais c'est vraiment au sein du phytoplancton	Il y a mise en jeu d'une logique classificatoire pour regrouper les organismes **au sein du phytoplancton** [sous-entendu sur la base de la photosynthèse]

Tableau 59 : extraits relatifs aux difficultés d'identification des activités de classification ou de tri dans les articles d'écologie

Suite à une question de Benoît (133), se trouve mise au débat la définition du processus de classement qui conduit à l'élaboration d'une classification. Plusieurs étudiants ne semblent pas avoir de difficultés à y répondre de manière formelle : « c'est regrouper les organismes en fonction de certains caractères » (Manuella, 136) ; « c'est agglomérer » (Valentino, 137), à savoir mettre en œuvre une logique agglomérative ascendante. Mais un peu plus tard, les propos d'Evelyne nous interpellent et méritent d'être analysés. Elle affirme clairement qu'une classification est produite par regroupement : « si on utilise le critère / enfin la fonction comme un critère de regroupement oui [c'est une classification] » (172). Mais immédiatement après, elle dit « ou différencier enfin je veux dire c'est pas forcément / on peut diviser aussi » (174). Comment interpréter cette affirmation « on peut diviser aussi » ? Deux hypothèses sont

envisageables. Elle pense sans doute qu'une classification peut être élaborée selon une logique divisive, indiquant alors une confusion possible entre les logiques de classement et de tri. Elle peut également vouloir dire qu'un critère donné sert à classer (suivant une logique agglomérative ascendante) ou bien à trier (suivant une logique divisive descendante). Il n'est pas possible de trancher entre ces deux hypothèses car Evelyne ne prolonge pas son argumentation au cours du débat. Cependant, le professeur demande s'il est possible de classer en divisant (175) et plusieurs étudiants répondent par la négative : Benoît, Valentino, Marina), sans que Evelyne ne s'y oppose.

Cependant, concernant l'article de Gasparini sur le plancton, Valentino pense que « c'est plus trier en fait » (180). Nous pouvons supposer en effet qu'il considère que l'auteur trie le plancton en deux catégories sur la base de la photosynthèse : phytoplancton (présence de la photosynthèse) et zooplancton (absence de la photosynthèse). Le peu d'informations fournit par l'auteur sur le zooplancton peut légitimement faire douter les étudiants. En effet, dans l'article, il est dit « le zooplancton représente la fraction animale du plancton », mais sans précision de ce que signifie « fraction animale ». Les organismes animaux sont-ils définis par l'auteur suivant l'absence de photosynthèse et suivant la logique de tri suggérée par Valentino ou bien par regroupement à partir de caractères partagés suivant une logique de classement (comme par exemple le mode de nutrition hétérotrophe et phagotrophe) ? Thomas prend partie et envisage qu'il n'y a classification que pour regrouper les organismes végétaux au sein du phytoplancton, par partage de la photosynthèse, de manière sous-entendue et largement discutée précédemment. Il dit en effet : « au sein du phytoplancton oui puisqu'il dit qu'il y a les diatomées il dit que c'est des algues unicellulaires il dit qu'il y a des bactéries et cyanobactéries mais c'est vraiment au sein du phytoplancton » (Thomas, 180). Pourtant si l'auteur met en œuvre une logique ascendante de regroupement aboutissant à la catégorie « phytoplancton » sur la base de la photosynthèse, c'est qu' *a priori* il ne met pas en œuvre une logique divisive de tri du plancton. Pourquoi Thomas limite-t-il donc la logique classificatoire au seul phytoplancton ? Au vu de ces extraits de débat, la logique suivie par Gasparini entre classification ou tri ne semble pas claire pour les étudiants. Il nous paraît donc préférable, dans une optique d'évolution de la reconstruction didactique, de proposer un article dans laquelle la démarche soit plus explicite. L'absence d'information sur la manière de catégoriser le plancton animal dans l'article n'est pas de nature à faciliter la réflexion des étudiants sur le processus de classement.

Pour conclure sur les articles écologiques, nous suggérons donc faire évoluer la séquence en ne proposant qu'un seul article écologique de nature scientifique, équivalent dans

son format aux articles systématiques, et dans lequel le processus de catégorisation ne soit pas ambigu.

- **Identification de difficultés non prévues concernant l'article de Cavalier-Smith et Burki**

Au cours de la discussion portant sur l'importance de l'évolution des méthodes de classification, nous avions mis en évidence certaines difficultés des étudiants à identifier les méthodes utilisées par T. Cavalier-Smith et F. Burki. Une différence théorique et méthodologique majeure entre les deux articles réside dans le recours aux fondements cladistiques hennigiens chez F. Burki mais pas chez T. Cavalier-Smith. La difficulté tient à ce que ces deux auteurs ne se positionnent pas explicitement par rapport à la cladistique. Dans l'optique d'une évolution de notre reconstruction didactique, il pourrait être bénéfique d'ajouter quelques documents complémentaires aux articles. Afin d'aider les étudiants à percevoir l'usage de l'homologie, non polarisée, que réalise T. Cavalier-Smith acceptant les groupes paraphylétiques dans sa classification, nous pensons que des apports complémentaires sont nécessaires pour une contextualisation théorique. Au cours du chapitre 3, nous avons proposé deux extraits issus des articles de 1993 et 1998 qui nous semblent adaptés (cf. p. 209), afin d'engager une réflexion et un débat sur la validité des groupes paraphylétiques dans les deux approches (systématique évolutionniste *vs* cladistique). Concernant la méthode phylogénomique mise en œuvre par F. Burki, il serait judicieux de proposer un petit document complémentaire explicitant les fondements méthodologiques de la phylogénomique qui permettrait d'aider les étudiants à établir la relation avec la méthode cladistique. En effet, les éléments dans l'article permettant de repérer les fondements théoriques mobilisés sont peu nombreux.

5.3.3. Faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais

Le choix de faire travailler les étudiants sur des sources primaires en anglais non traduites reste un projet ambitieux. Il repose tout à la fois sur la volonté de ne pas « dénaturer » les articles par une traduction et sur le pari de montrer aux futurs enseignants qu'une lecture d'articles scientifiques de langue anglaise est accessible, afin qu'ils n'hésitent pas à utiliser ces ressources au cours de leur carrière d'enseignant pour se mettre à jour et extraire des documents scientifiques à adapter en classe. Mais cela reste également un choix risqué puisque la lecture des articles en anglais pourrait démotiver les étudiants et être source d'une

incompréhension des articles, nuisant à la réflexion et au débat. Il est donc essentiel d'évaluer la faisabilité de ce choix didactique.

Rappelons ici que les étudiants n'ont pas été livrés à eux-mêmes car plusieurs éléments ont été prévus afin de faciliter leur appropriation des textes en anglais (cf. présentation de la séquence p. 504). L'évaluation de la faisabilité du travail sur des sources primaires non traduites ne peut donc se faire que dans le contexte de ce dispositif et aucune conclusion ne peut être tirée de manière absolue et généralisée à partir de cette seule étude de cas.

Au cours de la séance, aucune difficulté liée à l'anglais n'a été formulée explicitement par les étudiants. Lors de débat sur les articles, l'anglais n'a jamais été pointé comme posant problème et l'analyse des échanges ne révèle pas d'incompréhension de l'anglais susceptible d'entraver leur réflexion et le débat. Signalons que de temps à autre, les étudiants ont soutenu leur argumentation en citant en langue anglaise des extraits d'articles, ce qui atteste d'une appropriation, comme l'illustre la citation suivante portant sur l'arbre phylogénétique de Burki : « elle a été inspirée / à la fin il y a marqué this figure was inspired by a template provided by Y. Eglit » (Thomas, 708).

Ce résultat est à mettre en regard du niveau de master 1 des étudiants, mais également du fait que dans le master « enseignement » (MEEF SVT), il n'y a pas une culture de travail sur des articles scientifiques comme c'est le cas dans les masters « recherche ».

Ainsi, aucun changement n'a vraisemblablement besoin d'être apporté à la séquence du point de vue de la langue anglaise.

5.4. La réalisation de cartes conceptuelles comme outil d'analyse du raisonnement scientifique et de la problématisation (QR3)

Nous avons étudié préalablement les treize cartes conceptuelles élaborées par les étudiants pour contribuer à répondre à nos questions portant sur les recherches de signification et de faisabilité. Nous souhaitons désormais examiner une question d'ordre méthodologique afin d'examiner les potentialités et les limites de la réalisation de carte conceptuelle comme outil de recherche didactique visant à étudier le raisonnement des étudiants et le processus de problématisation.

Dans un premier temps, l'étude de la production finale sera l'occasion d'identifier des éléments que l'on souhaite interroger au niveau la construction de la carte. Ensuite, nous focaliserons l'étude de la construction de la carte sur des branches de la carte qui nous interrogent parce qu'elles sont en décalage avec les savoirs scientifiques travaillés durant la

séquence. L'objectif sera alors d'étudier l'argumentation des choix et d'identifier si les informations tirées de cette analyse sont de nature à mieux contrôler les inférences concernant les modèles explicatifs des étudiants. Dans un troisième temps, nous porterons notre attention sur des éléments absents de la carte (concepts ou liens conceptuels) qui sont pourtant l'objet d'échanges argumentés. Nous essaierons de comprendre les raisons de cette absence. Puis, nous caractériserons l'effet des contraintes liées à la nature de la tâche sur la production réalisée, toujours dans l'objectif de contrôler l'interprétation qui peut être faite de la production finale. Pour terminer, nous examinerons dans quelles mesures le dispositif expérimenté permet ou non l'étude de la problématisation durant la construction de la carte.

Si la réalisation de cartes conceptuelles peut être réalisée à grande échelle en vue d'une analyse quantitative des productions, l'étude qualitative du processus d'élaboration s'avère être beaucoup plus longue. Cette étude relève donc d'une étude de cas à visée heuristique.

5.4.1. De l'analyse de la carte conceptuelle à l'identification d'éléments à interroger au niveau de son élaboration

La carte conceptuelle A7 est présentée en figure 85. Le concept que ces deux étudiantes ont choisi de placer à la racine de la carte est « végétaux ». À partir de concept, deux branches se distinguent : « sont classés dans » et « sont définis selon », indiquant une différence entre les activités de classification et de définition, différence qui mérite d'être questionnée.

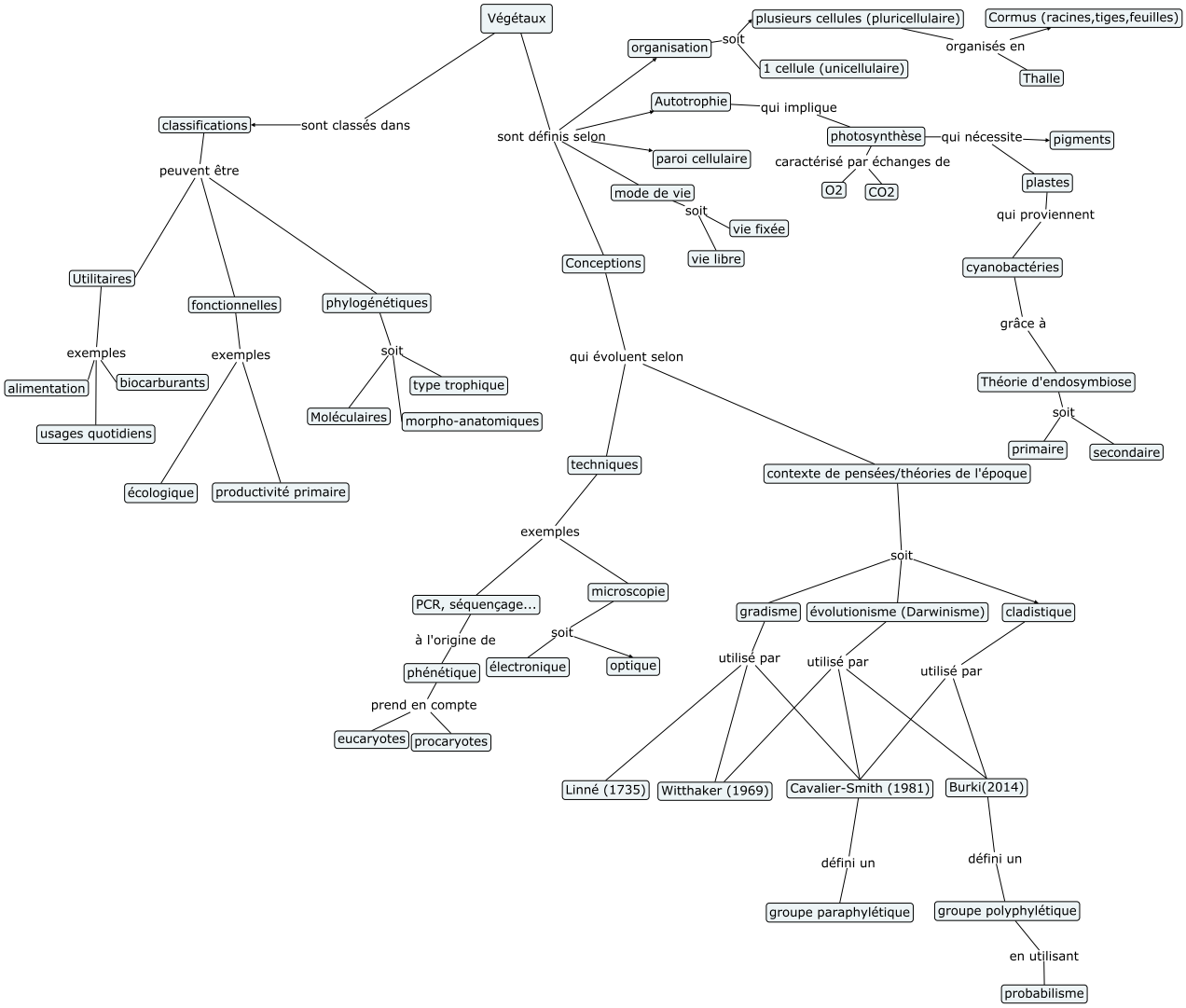


Figure 85 : carte conceptuelle A7

La consigne présentait deux aspects. Les étudiants doivent dresser le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique et expliquer comment et pourquoi ces conceptions ont évolué. Le binôme A7 a répondu aux deux aspects de la consigne comme le montre le tableau 60 (ci-dessous). Cinq conceptions des végétaux sont présentes alors que deux faisaient l'objet de la séquence : la conception phylogénétique et la conception fonctionnelle (écologique). La conception des végétaux liée à la classification de type utilitaire et anthropocentrée est présente bien que non travaillée. Dans la branche de la carte portant sur la définition des végétaux, les végétaux sont envisagés sous l'angle de leur structure cellulaire (cellule autotrophe avec paroi et plastes) ainsi que de leur organisation morpho-anatomique (thalle *vs* cormus). Nous considérons donc que deux autres conceptions des végétaux sont envisagées : une conception de type fonctionnelle et cellulaire (CFC) ainsi qu'une conception de type morpho-anatomique (en rapport avec la conception fonctionnelle

macrocentrée CFM). Concernant les raisons de l'évolution des idées, quatre aspects émergent de la carte : tout d'abord l'évolution des techniques et du contexte de pensée et des théories, branche au sein de laquelle apparaissent l'importance des méthodes de classification et la mise en jeu de valeurs et d'idéologies (le gradisme).

1/ Pluralité des conceptions : bilan chiffré	**5**
Conception phylogénétique (*objet de la séance sur articles*)	1 (dans la branche « classification»)
Conception fonctionnelle / écologique *(objet de la séance sur articles*)	1 (dans la branche « classification»)
Conception cellulaire et fonctionnelle	1 (dans la branche « définition »)
Conception utilitaire / anthropocentrée	1 (dans la branche « classification»)
Conception morpho-anatomique	1 (dans la branche « définition »)
2/ Pourquoi et comment ont-elles évolué ?	**4**
Évolution des méthodes de classification	1
Prise en compte de l'homologie	0
Mobilisation de théories (théorie cellulaire, théorie de l'évolution, endosymbiose...)	1
Mobilisation de nouvelles techniques (microscopie, séquençage, PCR, bioinformatique…)	1
Manifestation de valeurs, d'idéologies	1
Problème de la place des unicellulaires	0
Prise en compte de la photosynthèse dans la séparation des champignons	0

Tableau 60 : analyse de la carte conceptuelle A7 pour les deux aspects de la consigne

L'étude de la carte fait apparaître plusieurs questions récapitulées dans le tableau 61, ci-après, que l'analyse de l'élaboration de la carte devrait éclairer, au moins partiellement.

Éléments de la carte attirant notre attention	Question
Définir un groupe biologique et classer	
Dichotomie entre les activités de définition (« définis selon ») et de classification (« sont classés dans »)	Comment est pensée cette dualité ? Les activités de classification et de définition seraient-elles en lien (malgré l'absence de connecteurs entre ces deux parties disjointes de la carte) ou bien au contraire totalement différentes ?
Les méthodes de classification	
Citation de la phénétique alors que cette méthode n'a pas été utilisée par les auteurs étudiés. Les outils moléculaires (PCR, séquençage…) ne sont mis en lien qu'avec la phénétique et pas avec la cladistique ou les méthodes probabilistes.	Comment est pensée la relation entre méthodes de classification et caractères moléculaires ?
Relations inadéquates entre cladistique et Cavalier-Smith d'une part et entre Cavalier-Smith et groupe paraphylétique d'autre part	Pour quelle raison Cavalier-Smith est-il indiqué comme cladiste dans la carte ? Est-ce un problème de compréhension de la méthode cladistique ou de l'article de Cavalier-Smith ? Idem pour l'usage du concept hennigien de paraphylie non utilisé par Cavalier-Smith.
Le gradisme	
Relation inadéquate entre gradisme et Linné	Comment comprendre cette association ? Le gradisme est-il réduit à l'idée d'échelle des êtres, indépendamment de toute idée évolutive ?
Absence de certains concepts ou de certaines relations entre concepts	
Absence de relation entre « classification fonctionnelle / écologique » et Whittaker	L'absence de relation traduit-elle un choix délibéré et argumenté ou bien n'est-elle pas consciente ou encore est-ce le fruit de difficultés de construction de la carte ?
Absence de citation des deux auteurs des articles d'écologie (Gasparini ; Sabine) alors que les auteurs des trois articles portant sur la systématique des eucaryotes sont cités	
Absence de certains aspects travaillés dans la séance sur articles : le problème de la place des unicellulaires, le problème de la place des champignons chez Whittaker, l'usage de l'homologie	

Tableau 61 : questions posées par l'analyse de la carte conceptuelle A7

Pour répondre à ces questions et comprendre dans quelle mesure l'étude argumentative donne accès à la problématisation conduite par les étudiants, analysons le processus de construction de la carte.

5.4.2. Argumentation de certains choix de construction du réseau conceptuel

- **Définir et classer**

Quelles sont les raisons qui expliquent la présence de deux branches majeures de la carte distinguant la définition des végétaux de leur classification et sans aucun connecteur reliant les concepts des deux branches ?

La discussion analysée ci-après prend place alors qu'une liste de concepts a été établie suite au brainstorming. Les deux étudiantes commencent alors à établir des liens entre les concepts. Elles ont regroupé dans un même espace de la carte les termes ayant trait aux techniques, indiquant leur importance dans l'évolution du concept de végétal (109). Puis Helena (112) propose de partir des différents auteurs : « *par exemple on part de Whittaker euh / Whittaker il pensait tel tel truc / machin il pensait tel tel truc* ». Manuella écarte cette proposition (115) car elle pense que cela va entraîner des répétitions non souhaitables : « *parce que du coup on remet où photosynthèse / ça va être partout tu vois* ». C'est alors que Helena propose d'utiliser le terme « définition », comme l'indique le tableau 62.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
118	Helena	ça (vie fixée) ça va dans une **définition** en fait	Proposition d'un réseau centré sur la définition des végétaux
119	Manuella	voilà c'est bien **définition** / photosynthèse pigments bah c'est ça plastes	Validation de la proposition par Manuella qui y place la photosynthèse et les concepts associés
120	Helena	plastes autotrophie	Développement du réseau conceptuel associé à la photosynthèse
121	Manuella	ouais	
122	Helena	bah du coup en fait ça va aller avec plastes (en parlant du concept "endosymbiose")	
123	Manuella	ouais plastes / et cyanobactéries du coup avec l'endosymbiose	

Tableau 62 : extraits correspondant à l'introduction du concept de « définition » des végétaux

La proposition d'utiliser le terme « définition » des végétaux est acceptée immédiatement par Manuella. Il va ensuite donner lieu à l'élaboration de plusieurs réseaux conceptuels associés à la définition des végétaux : le réseau de la photosynthèse (présenté en partie dans le tableau 62) et celui de l'organisation cellulaire et morpho-anatomique. En poursuivant les regroupements de concepts, Helena (136) propose de regrouper les différents scientifiques avec les arbres et les classifications :

> « donc **ça c'est des gens** (en parlant des quatre noms d'auteurs regroupés à gauche de la figure 86) / ça c'est à mettre **avec les arbres** (en déplaçant les termes règne et super-groupe, espèce et groupe) / OK // donc ça (moléculaire) **ce serait plutôt avec les techniques de classification** (en le rapprochant des termes classification, cladistique phénétique, probabilisme) // dans fonctionnelle il y aurait biocarburants usages quotidiens et alimentation. » (Helena, 136)

Pourtant, dans la carte finale, les noms d'auteurs ne sont pas dans la branche « classification » mais dans la partie « conceptions / contextes de pensée ». Nous allons chercher à comprendre comment cette séparation s'est établie entre classification et définition incluant les conceptions et les différents scientifiques.

La figure 86 présente l'état de la carte avec des groupes de concepts dont la relation n'est pas encore représentée graphiquement mais est discutée oralement.

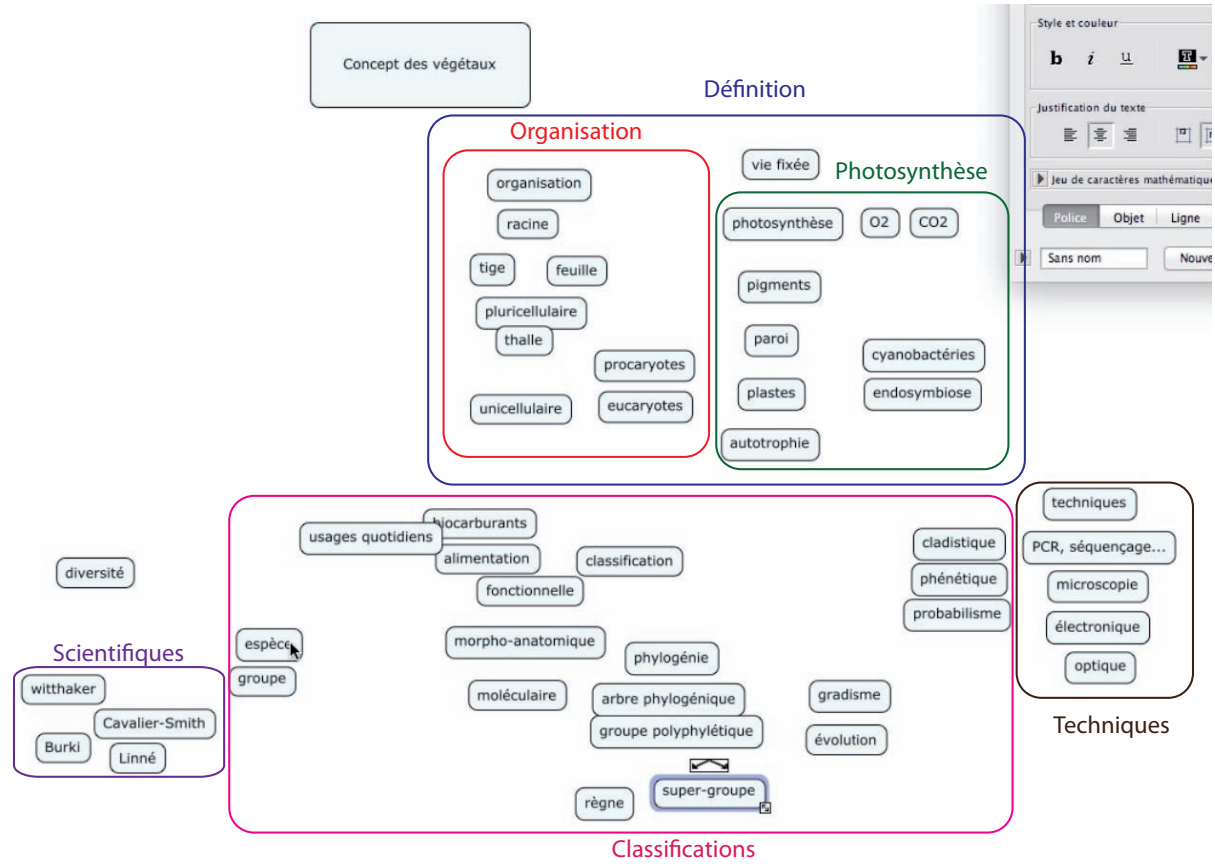


Figure 86 : les différents regroupements conceptuels à 16'47''

Assez rapidement est avancée l'idée qu'il n'existe pas une unique définition des végétaux et que leurs caractéristiques définitoires dépendent des différentes conceptions (cf. tableau 63), bien que cela n'apparaisse pas clairement dans la carte.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
128	Helena	ouais / alors **donc dans la définition // tout est dans la définition / en fait les définitions vont changer en fonction de / de la conception**	Formulation très importante de la **relation de dépendance des définitions (au pluriel) avec les conceptions** des végétaux
155	Manuella	OK / alors / revenons du coup en haut / qu'est-ce qu'on mettrait du coup juste en dessous de concept des végétaux	Retour sur la première caractérisation des végétaux
156	Helena	déjà si on parle de ça (organisation)	
157	Manuella	déjà définis / on peut mettre « **définis** » / un végétal	
158	Helena	**mais justement la définition elle change en fonction des conceptions** / mouais	Nouvelle formulation **du lien entre définition / conception** formulé en 128
159	Manuella	alors bah c'est ça / euh / définition / là on met concept des végétaux ou juste végétaux	
160	Helena	Euh	
161	Manuella	**défini en fonction de / des concepts / des conceptions du coup / végétaux**	Proposition du lien unissant la définition et les conceptions

Tableau 63 : introduction de la relation de dépendance entre les définitions et les conceptions des végétaux

Les extraits présentés dans le tableau 64 indiquent comment apparaissent les deux branches primaires de la carte séparant définition et classification.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
173	Manuella	(…) **est défini selon les conceptions** / regarde ce que l'on peut mettre encore / si on doit mettre différentes choses autour / après	
174	Helena	on peut mettre **sont classés selon / machin**	Passage des conceptions aux **classifications** selon les différents auteurs

177	Manuella	alors sont classés	
178	Helena	selon / **des classifications** (rire)	Conjugaison au pluriel des classifications : pluralité de systèmes classificatoires
179	Manuella	euh **sont classés euh / dans euh / différentes classifications** / non c'est ça / c'est encore / sont regroupés / ah non ça c'est / cette classification on en reparlera avec les autres / tu vois ?	
180	Helena	non sinon / **on a les conceptions / qui permettent de classer**	Ce sont les conceptions qui permettent de classer. Qu'entend Helena par « conceptions » ? Est-ce que cela correspond aux techniques et théories qui sont représentées dans la carte finale comme influençant l'évolution des conceptions ?
181	Manuella	ouais / est défini selon les conceptions	Reprise du lien définition / conceptions formulé précédemment
182	Helena	est défini selon	
183	Manuella	les conceptions	
184	Helena	sinon on met les conceptions après c'est pas grave / on met défini selon les conceptions / on met les différentes / non ça va faire **répétition** à chaque fois	Souhait de ne pas construire une carte avec des **répétitions**
187	Manuella	du coup c'est des classifications qui sont fonctionnelle utilitaire / c'est les classifications utilitaires ?	Discussion sur le réseau conceptuel de classification pour lui-même en laissant provisoirement de côté le lien aux conceptions et à la définition
189	Manuella	ouais c'est ça du coup / sont classés / **on peut mettre classifications en haut / un peu plus loin** / et là / qu'est-ce qu'on pourrait mettre ? (comme connecteur entre végétal et classification) (…)	Construction d'une branche « classification » indépendante de la branche définition
190	Helena	(…) euh / sinon est-ce qu'on part pas / **est-ce que ça (est défini selon) ça serait pas <u>à la fin</u> ? / <u>à la fin</u> on**	Proposition de <u>terminer</u> par « définition » plutôt que de commencer la carte par cela

		établit ouais mais non / du coup il y a plusieurs définitions	Mais invalidation de la proposition car il y aurait plusieurs définitions, ce qui semble gênant
193	Manuella	végétaux / sont classés dans / mais après / classification ? / ouais voilà c'est ça	Cf. Figure 87
194	Helena	sont classés / dans tu m'as dit	
195	Manuella	du coup là on mettrait classification	
196-319	Développement du réseau conceptuel « classifications »		

Tableau 64 : mise en place des deux premières branches de la carte « sont classés dans » et « sont définis selon »

La nature de la relation entre les activités de classification et de définition semble difficile à établir pour Helena et Manuella. En effet, les végétaux sont définis selon différentes conceptions (173), mais ils sont classés par différents auteurs et différents systèmes (174-179). Helena propose que les conceptions permettent de classer (180), sans plus d'explication, ce qui interroge concernant ce qu'Helena désigne par conception. Elle avance également l'idée (190) que la définition puisse être posée seulement à la fin et non au début de la carte. Cette idée est intéressante car nous l'interprétons comme pouvant traduire l'idée que la définition d'un groupe n'est pas première mais la résultante de l'activité de classification. Cependant elle n'est pas retenue au motif suivant : « ouais mais non / du coup il y a plusieurs définitions ». Il semblerait gênant pour Helena qu'il y ait plusieurs définitions dans la carte alors même qu'elle a pourtant conscience de la pluralité de définitions en lien avec les différentes conceptions (cf. tableau 63). La difficulté de clarifier les liens entre classification et le couple définitions / conceptions aboutit finalement à deux branches distinctes (figure 87).

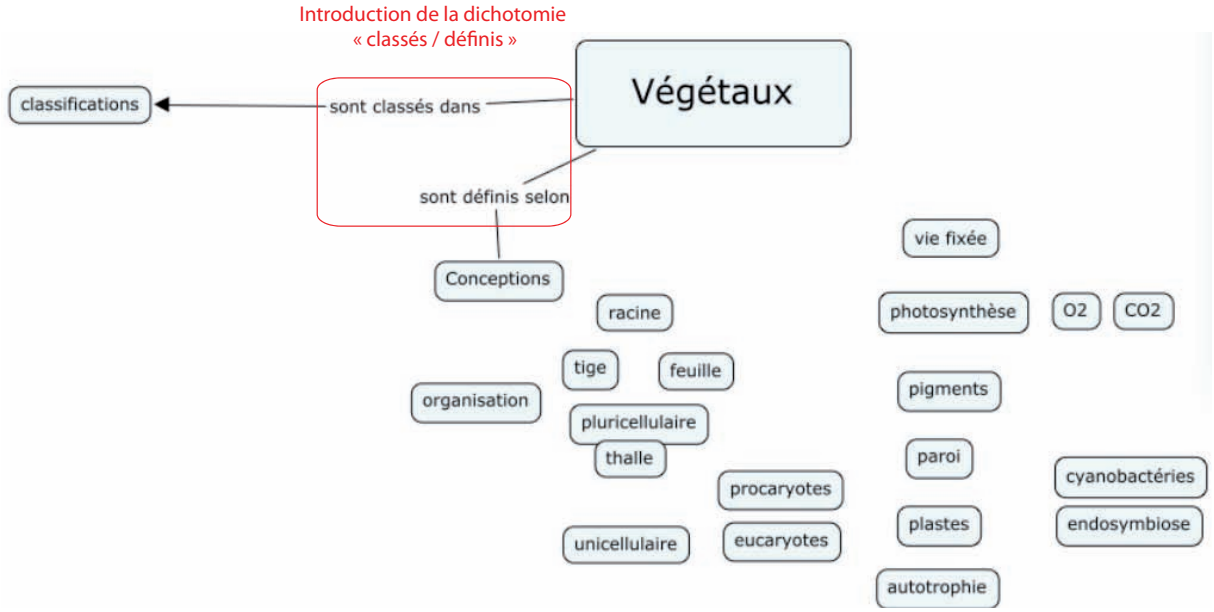


Figure 87 : introduction de la dichotomie « classés / définis » (carte à 25'26'')

Mais il est envisageable que, au sein de ces deux branches, des concepts soient reliés entre eux, attestant de la perception d'un lien entre classification et la définition des végétaux, que les étudiantes associent aux conceptions des végétaux. Le tableau 65 focalise sur plusieurs relations conceptuelles au sein des branches « classifications » et « définition / conceptions ».

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
320	Helena	mais du coup tu vois / **unicellulaire le problème c'est que / pas dans toutes les conceptions**	Indication que **la prise en compte des unicellulaires dépend des conceptions**. Pourtant cette flèche n'apparaît pas dans la carte finale.
321	Manuella	ouais	
322	Helena	dans les / **dans les premières conceptions il n'y a pas unicellulaires** / c'est ça le problème	
323	Manuella	donc là on parle que / que des conceptions	
324	Helena	bah il faut / il faut	
325	Manuella	conceptions des végétaux / ouais mais dans les conceptions on parle bien quand même d'unicellulaires / ça arrive	
326	Helena	oui mais le truc c'est que / si on le met là faudrait ouais / qu'on le mette comme ça / **qu'on puisse faire des**	Souhait affiché par Helena d'établir dans un second temps des liens entre les différents auteurs / systématiciens

		liens après / avec nos différentes conceptions (en montrant les différents auteurs)	et la relation avec la définition des végétaux, mais non réalisé au final
327	Manuella	on verra	Manuella diffère « on verra »
328	Helena	tu vois ça c'est pareil c'est pas dans toutes les conceptions vie fixée	Même problème avec la vie fixée, caractéristique définitoire des végétaux dans certains systèmes classificatoires seulement
329	Manuella	mais tout n'est pas dans les différentes [conceptions	
330	Helena	bah c'est ça et je sais pas comment]	Formule la difficulté de représenter dans la carte cette relation entre les différentes définitions et les différentes conceptions (au sens de système classificatoire)
331	Manuella	donc on met plus rien alors	
332	Helena	ah non je ne dis pas qu'on ne les met pas [je dis que	
333	Manuella	on va] **d'abord** faire les différentes conceptions et **après on verra si on va mettre des liens** / si on connaît des liens entre les différentes choses	Diffère la question des liens
334	Helena	d'accord	

Tableau 65 : relations entre plusieurs concepts des branches « classifications » et « définition / conceptions »

Plusieurs relations conceptuelles sont discutées oralement mais sans que cela aboutisse à la mise en place de connecteurs graphiques dans la carte. Ainsi Helena indique la difficulté d'intégrer dans la carte les termes d'unicellulaires ou de vie fixée dont la prise en compte dépend des conceptions (en pointant sur l'écran les différents scientifiques). Ne sachant pas comment gérer cela lors de la construction de la carte, Manuella dit « donc on met plus rien alors » (331) puis diffère le problème qui ne sera finalement pas réglé en fin de séance : « on va d'abord faire les différentes conceptions et après on verra si on va mettre des liens » (333). Aussi les termes liés à la définition ne sont pas reliés à ceux du réseau « conceptions ». Cependant, face au fait que toutes les conceptions ne limitent pas les végétaux aux seuls organismes fixés, est ajouté le mode de vie libre, comme l'indique Helena (534) : « vie fixée

il nous faut un vie libre aussi ». Certains aspects de diversité sont donc mis en balance : vie libre / vie fixée ; unicellulaire / pluricellulaire ; cormus / thalle. Mais concernant le mode de nutrition autotrophe, les difficultés semblent plus importantes comme l'indique le tableau 66.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
518	Helena	tu vois je pense qu'on mettrait **notre définition** / donc là autotrophie (rapprochée du connecteur "sont définis selon") / photosynthèse / du coup pigments	Retour sur le réseau de la photosynthèse au sein de la définition
519	Manuella	**ouais mais ils sont pas tous autotrophes**	Problème de l'existence de végétaux non autotrophes (sans citer d'exemple précis) : tous les végétaux ne sont pas autotrophes alors que l'autotrophie est pointée comme une caractéristique définitoire des végétaux. **Paradoxe apparent**
520	Helena	ouais mais voilà quoi (rire)	Ne souhaite pas résoudre le paradoxe et avancer dans la construction de la carte
521	Manuella	bah ouais mais bon (non satisfaite)	

Tableau 66 : le problème de l'autotrophie pour définir les végétaux

Manuella indique qu'il y a un problème à définir les végétaux par leur autotrophie puisque toutes les espèces végétales ne sont pas autotrophes. Ce paradoxe apparent pourrait être levé de plusieurs façons. Par exemple en indiquant que cela pose un problème uniquement dans le cadre de certaines conceptions des végétaux ou encore qu'il s'agit d'une perte secondaire dans le cadre d'un raisonnement phylogénétique. Mais le problème est éludé d'un simple « ouais mais voilà quoi (rire) » (Helena). Dans cet exemple, l'argumentation n'est pas assez développée pour proposer une interprétation suffisamment solide. La non-résolution de ce paradoxe apparent peut traduire une simple volonté d'avancer dans la construction de la carte sans discuter de tous les nœuds pour aboutir et réaliser la tâche dans le temps imparti. Mais cela peut également indiquer une profonde difficulté à prendre en compte des organismes non photosynthétiques parmi les végétaux. Cette difficulté avait été identifiée au cours de l'enquête sur les conceptions des étudiants dans le cas de l'orobanche (cf. chapitre 2, p. 146).

Au final, la carte laisse apparaître un décalage entre une définition absolue des végétaux basée sur certains critères dont l'autotrophie ou la paroi et la relation avec les différentes conceptions des végétaux, évoluant sur un plan historique, sans que n'apparaisse la nature de cette relation (cf. figure 88).

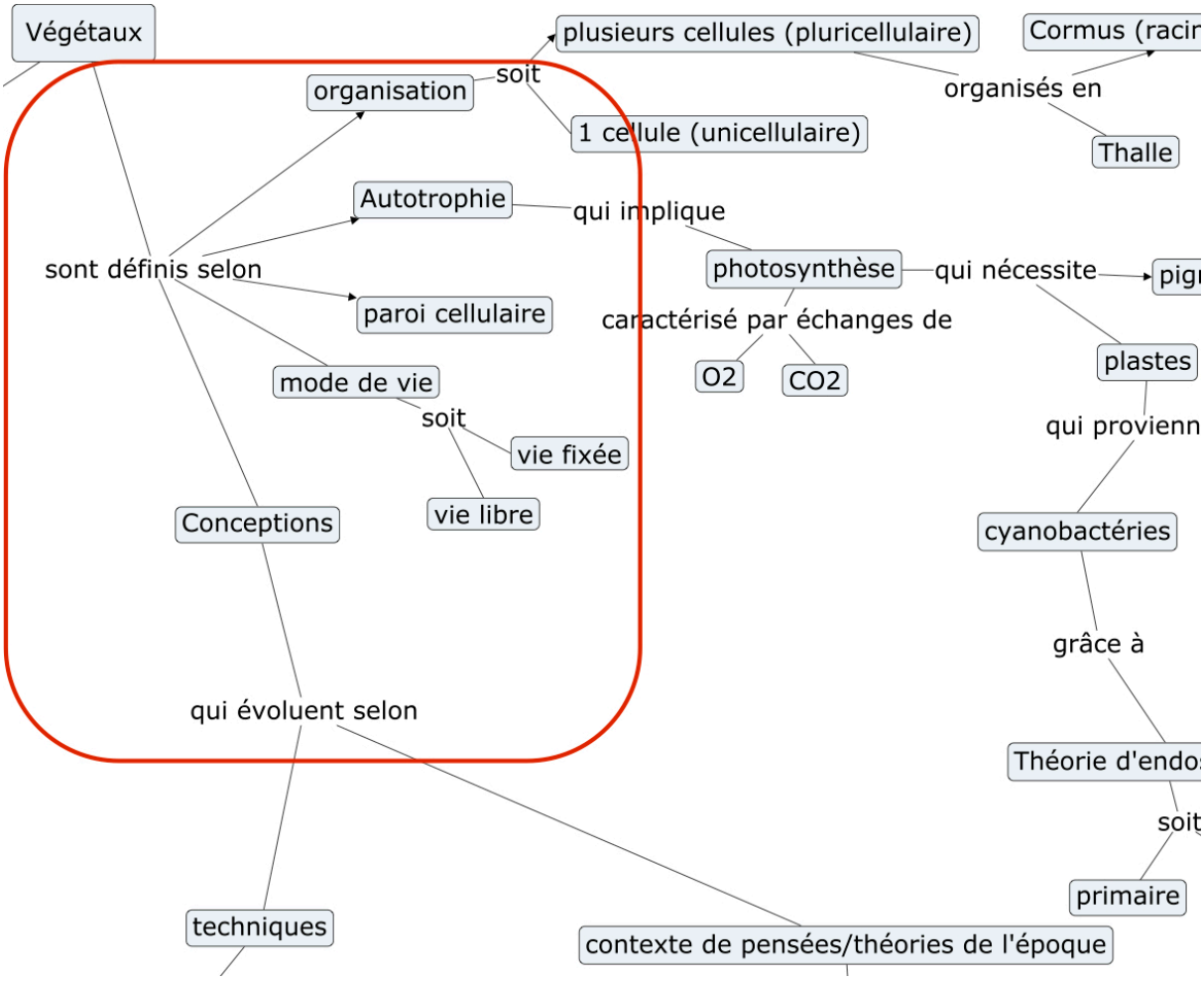


Figure 88 : zoom sur le décalage entre une définition absolue des végétaux et la dépendance à des conceptions qui évoluent historiquement

L'absence de connexions entre les deux branches majeures de la carte (sont définis selon / sont classés dans) est frappante. Cependant, au cours de la construction de la carte, Helena propose d'établir une relation entre les techniques (appartenant à la branche de définition) et les classifications (qu'il s'agisse du type de classification et des méthodes utilisées). Cette mise en lien est discutée oralement (cf. tableau 67) et correspond à l'état de la carte présentée en figure 89.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
394	Helena	regarde si on fait **techniques** donc PCR microscopie / on arrive à des / des classifi euh ouais du coup / on arrive à des **classifications** du coup / **on peut peut-être essayer de faire un lien avec phylogénétiques** / on obtient phénétique cladistique / la microscopie on va soit aller on a besoin de l'électronique soit on a besoin de l'optique après tout ça je ne sais pas	Tentative d'établir un lien entre réseau « classification » et « techniques » au sein de la branche « définition / conceptions » Cf. Figure 89

Tableau 67 : mise en relation orale et non graphique entre les techniques et les classifications

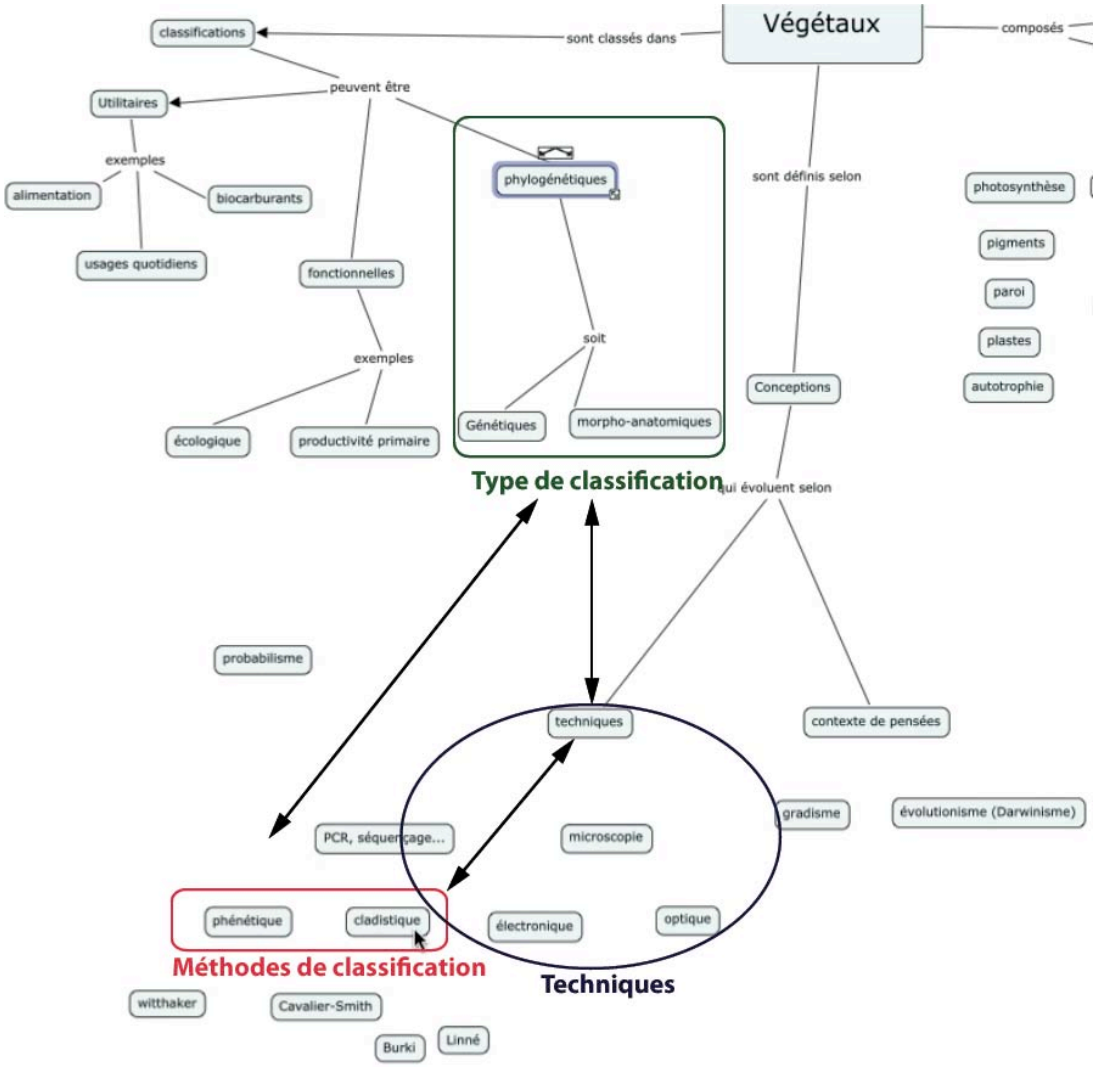


Figure 89 : état de la carte à 49' lors de la discussion de liens, non représentés, entre type de classifications, méthodes et techniques (394)

Mais ce court échange n'aboutit pas non plus à l'établissement de connecteurs graphiques dans la carte finale. Au cours de la construction de la carte, les étudiantes vont discuter d'autres réseaux conceptuels mais sans revenir sur ce lien par manque de temps. Ce résultat appelle donc à une certaine prudence quant à l'interprétation que l'on peut faire d'une carte. En effet, les deux branches majeures apparaissent finalement disjointes alors que les étudiantes ont conscience de l'existence d'un lien conceptuel.

- **Les méthodes de classification**

L'analyse de la séance de débat collectif avait montré des difficultés à identifier les caractéristiques des différentes méthodes dont la phénétique et la cladistique. La figure 90 indique deux relations conceptuelles faisant écho à ces difficultés et que nous souhaitons interroger : la relation entre les données moléculaires (PCR, séquençage) et les méthodes de classification (phénétique) d'une part, la relation entre la cladistique et Cavalier-Smith d'autre part.

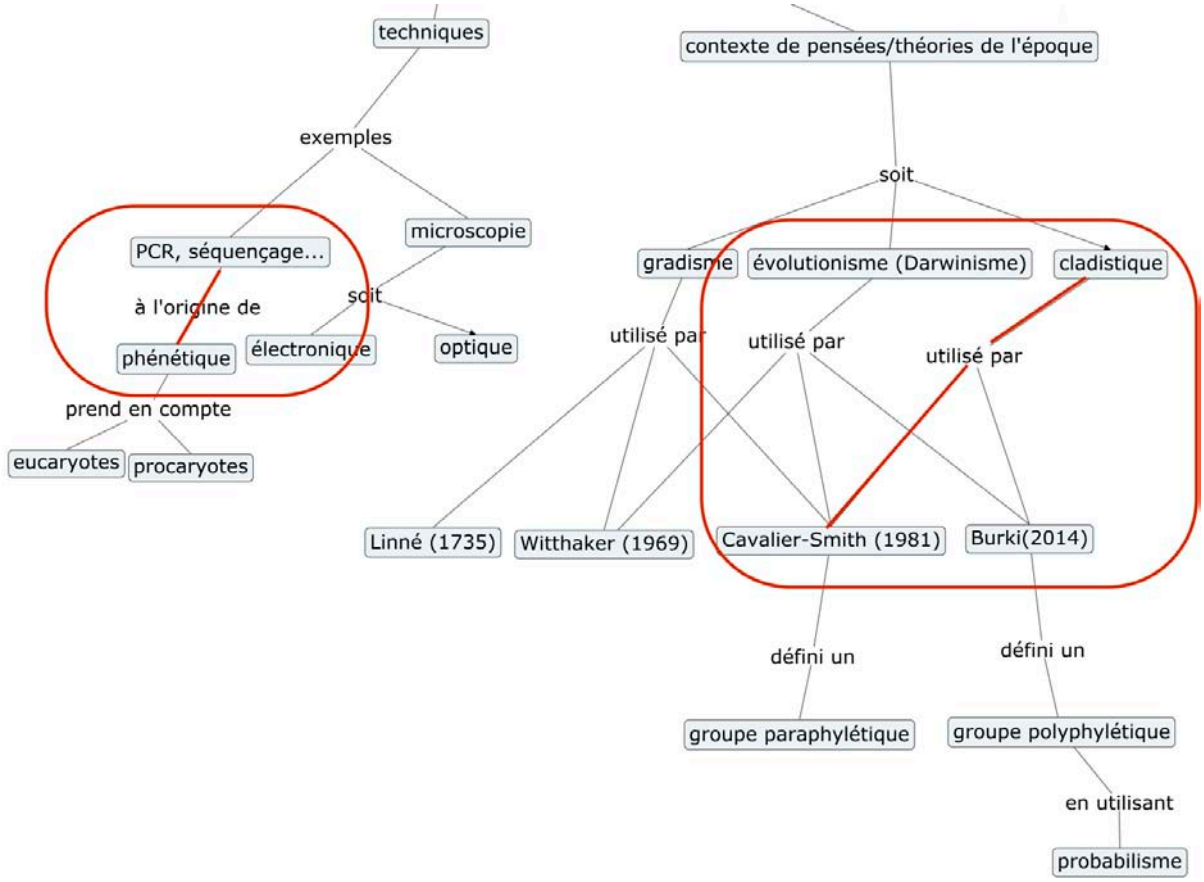


Figure 90 : zoom sur la carte soulignant des liens que nous souhaitons questionner

Analysons tout d'abord le lien entre les caractères moléculaires et les méthodes de classification. Les échanges présentés dans le tableau 68 font suite au rattachement du nœud

« PCR, séquençage » à la phénétique. Les étudiantes s'interrogent alors concernant l'utilisation que fait la cladistique de ce type de caractère.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
431	Manuella	est-ce qu'il y a besoin forcément de techniques comme celles-ci (PCR, séquençage) pour la cladistique	Questionnement sur la nécessité de caractères moléculaires pour la cladistique
432	Helena	**bah non**	Réponse négative
433	Manuella	bon / c'est /	
434	Helena	sinon on peut mettre juste euh / observations morpho-anatomiques	Proposition de lier la cladistique aux caractères-morpho-anatomiques et non pas aux caractères moléculaires
716	Manuella	(…) et du coup phénétique c'était utilisé quand ?	Retour en fin d'élaboration de la carte sur la phénétique
717	Helena	mais c'est tout ce qui est moléculaire phénétique / pour moi / donc du coup	Association proposée par Helena entre phénétique et données moléculaires
729	Helena	bah **c'est pas mal**	Indicateur de satisfaction

Tableau 68 : l'usage des caractères moléculaires en phénétique et cladistique

Elles associent, à tort, la phénétique à l'analyse de données moléculaires et la cladistique aux données morpho-anatomiques. Le tableau 69 questionne au sujet de la relation entre Cavalier-Smith et la cladistique observée dans la carte.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
666	Manuella	(…) c'est utilisé que par lui (Burki) cladistique	Question sur les auteurs utilisant l'approche cladistique autre que Burki
667	Helena	non non non non	Prise de position très claire
668	Manuella	par qui d'autres encore ? mets le maintenant comme ça	Reformulation de la question
669	Helena	lui je pense (Cavalier-Smith)	Réponse : Cavalier-Smith, mais sans justification
670	Manuella	ouais	Validation
671	Helena	et pas trop lui hein (Whittaker) / c'est **pas encore** hein	Whittaker ne serait pas cladiste. Argument de **temporalité**
711	Helena	(…) mais en fait est-ce que c'est pas / lui (Burki et groupe polyphylétique) / par contre eux ils définissent quand même / ils définissent **un groupe des végétaux**	Proposition que le groupe des végétaux soit de nature **paraphylétique** pour certains auteurs

		quand même // euh **groupe para** sinon (écrit groupe paraphylétique)	
712	Manuella	**je sais pas** si c'était ce terme là mais bon	Doute sur le terme paraphylétique
713	Helena	euh Cavalier-Smith je crois	Association entre Cavalier-Smith et paraphylétique
714	Manuella	d'accord	Validation par Manuella
715	Helena	ah je sais plus / si c'est ça	Modalisateur logique de doute

Tableau 69 : la cladistique et les différentes systématiciens

À tort, Cavalier-Smith est associé à la cladistique mais sans aucune justification. Nous ne pouvons donc pas savoir ce qui fonde cette association qui avait été déjà discutée pendant le débat collectif. Helena avance qu'il aurait défini les végétaux comme un groupe paraphylétique, sachant que le concept de paraphylie est lié à l'approche cladistique. Mais elle formule à deux reprises qu'elle n'est pas sûre de ce qu'elle avance.

Ces extraits confirment donc les difficultés déjà apparues lors du débat collectif, indiquant un déficit dans la compréhension des raisons et des fondements des méthodes de classification cladistique et phénétique.

En outre, sur un plan méthodologique, ces deux exemples montrent que la prise en compte de modalisateurs logiques de doute apporte une information importante au chercheur sur la confiance accordée sur certaines branches : « bah c'est pas mal » (729) ou à l'inverse « ah je sais plus / si c'est ça » (715).

- **Le gradisme**

Dans la carte, le gradisme est associé à plusieurs scientifiques : Whittaker, Cavalier-Smith mais aussi Linné. Si les deux premiers ont bien fait l'objet d'une part importante du débat collectif, le lien avec Linné nous interroge car ce dernier était fixiste alors que le gradisme est lié à une pensée évolutionniste. Le tableau 70 présente l'extrait où ce lien conceptuel est discuté.

N°	Locuteur	Verbatim
25	Manuella	Fixisme
26	Helena	bah là il n'y en a pas
27	Manuella	y' en a pas vraiment
28	Helena	dans les conceptions qu'on a vus euh
29	Manuella	ouais c'était du gradisme / ouais on va parler plutôt du gradisme

413	Manuella	est-ce qu'on met sur du côté et on fait un lien / je sais pas / Linné (en tombant sur ce concept à déplacer) c'était avec les trois règnes
414	Helena	Linné ?
415	Manuella	ouais c'était avec gradisme ça c'est sûr
644	Helena	ouais / soit ça / soit ça // Linné il est surtout dans le gradisme
645	Manuella	utilisé tu peux mettre (entre gradisme et Linné) / utilisé par
646	Helena	Ouais

Tableau 70 : le gradisme et Linné

Pour Helena et Manuella, le caractère gradiste de la classification linnéenne ne fait aucun doute : « c'était avec gradisme ça c'est sûr » (415) ou « Linné il est surtout dans le gradisme » (644). Mais cette affirmation n'est pas justifiée. Dans ce cas, l'analyse argumentative ne permet pas d'en connaître les fondements mais de savoir que les étudiantes accordent une grande confiance à ce lien conceptuel. Il interroge sur leur compréhension du gradisme. Deux hypothèses semblent pouvoir être avancées. Il est possible que les étudiantes réduisent le gradisme à l'idée d'échelle des êtres et de degré de complexité, sans y associer de pensée évolutionniste. Une seconde hypothèse possible est que les étudiantes considèrent Linné comme un évolutionniste. Cela semble très surprenant car il est notoirement connu pour son système classificatoire cherchant à retracer l'ordre divin de la Création. Mais cette hypothèse n'est pas à écarter. En effet, lors de la mise en commun du brainstorming initial, Manuella propose le concept de fixisme. Helena lui répond : « bah là il n'y en a pas » (26), ce que valide Manuella : « y' en a pas vraiment » (27). Elles poursuivent : « dans les conceptions qu'on a vus euh » (Helena, 28), « ouais c'était du gradisme / ouais on va parler plutôt du gradisme » (Manuella, 29). Mais cette hypothèse ne peut pas être validée avec certitude car Linné a été introduit dans la carte que plus tardivement (86).

5.4.3. Éléments faisant l'objet de discussions mais n'apparaissant pas dans la production finale

Lors de l'analyse précédente consacrée à la compréhension de la signification de la dichotomie « définir et classer », nous avons mis en évidence que plusieurs liens conceptuels furent discutés mais sans figurer sur la carte finale. Nous souhaitons ici présenter d'autres éléments ayant fait l'objet d'un débat mais n'apparaissant pas dans la carte. Notre objectif reste l'identification de ce que cela apporte à la recherche concernant l'étude du raisonnement des étudiants.

- **Débat sur classification fonctionnelle et utilitaire**

La carte comporte un type de classification n'ayant pas fait l'objet de la reconstruction didactique : les classifications utilitaires. Le tableau 71 permet d'étudier comment les étudiantes comprennent ce type de classification.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
88	Manuella	on pourrait parler de **leur utilité** / mais du coup **c'est pas scientifique** / par exemple biocarburants / alimentaire	L'utilité (pour l'Homme) des végétaux est considérer comme ne relevant pas du champ scientifique.
89	Helena	bah **c'est dans les fonctions** / dans **fonctionnelle** on va avoir euh / biocarburants / alimentation / qu'est-ce que tu voyais d'autre ?	Proposition de l'associer aux classifications fonctionnelles. Ne propose pas d'en faire un type de classification à part
145	Manuella	et utilitaire / on n'a pas utilitaire / c'est tout ce qui est biocarburants	Nouvelle formulation de l'existence de classification utilitaire
146	Helena	ah ça c'est fonctionnelle	Même réponse que précédemment : c'est de type fonctionnel
147	Manuella	fonctionnelle c'est	Début d'opposition : « fonctionnelle c'est », sous-entendu autre chose…
148	Helena	c'est plutôt euh / les fonctions d'accord / donc utilitaire	Basculement vers l'idée qu'il s'agit d'un autre type de classification. Accepte la proposition de mettre « utilitaire » en le distinguant de « fonctionnelle »
149	Manuella	fonctionnelle on met quoi dedans ? c'est tout le reste ou ?	Échanges sur la classification fonctionnelle de type écologique
150	Helena	fonctionnelle on aurait / euh // productivité primaire	
151	Manuella	ouais voilà	
152	Helena	productivité primaire qu'est-ce qu'on aurait d'autre	
153	Manuella	écologique	

Tableau 71 : les classifications utilitaire et fonctionnelle

Dans un premier temps, Helena refuse la suggestion de distinguer les classifications utilitaires comme un type à part. Elle les considère comme étant de nature fonctionnelle. Bien que peu argumentée, l'insistance de Manuella permet de faire changer d'avis Helena et de séparer

dans la carte classifications fonctionnelle et utilitaire. Notons que Manuella indique que les classifications utilitaires ne sont pas scientifiques (88). Il serait intéressant de pouvoir creuser cet aspect qui renvoie à la dimension épistémologique de scientificité des classifications.

- **Absence de citation de Gasparini et Sabine**

Il est frappant de constater que tous les auteurs étudiés sont cités dans la carte, à l'exception des auteurs des deux extraits d'articles d'écologie : Gasparini et Sabine. Quelle en est la raison ? Un seul tour de parole éclaire cette question : « ah y avait pas les deux autres / comment ils s'appelaient // Gasparini et / non ça / c'était pas/ c'était avec le phytoplancton » (Manuella, 407). Manuella écarte Gasparini en raison de sa focalisation sur le phytoplancton et non l'ensemble des végétaux. L'article de Sabine est mis dans le même ensemble alors qu'il portait sur le cycle biochimique du carbone de manière globale. Cette donnée établit un argument supplémentaire indiquant que le choix de cet article pour la reconstruction didactique n'était pas le plus approprié (cf. partie 5.3.2, p. 378).

- **Lien entre Whittaker et classification fonctionnelle**

Dans la carte, Whittaker n'est reliée qu'à gradisme et évolutionnisme (Darwinisme), mais absolument pas à la branche « classifications / fonctionnelles » alors que son système classificatoire a une double visée écologique et évolutive. Comment interpréter cette absence de lien ? Helena (236) dit : « bah oui mais Whittaker c'était purement fonctionnel hein / parce que c'était la nutrition ». Autrement dit, nous pouvons affirmer que les étudiants ont conscience que Whittaker s'est basé sur les modes de nutrition pour établir sa classification. L'absence de lien n'est donc pas à mettre sur le compte d'une incompréhension mais peut être d'un manque de temps pour finaliser les connecteurs entre branches.

- **La relation entre méthodes probabilistes, phénétique et cladistique**

L'analyse de la construction de la carte fait surgir une difficulté relative aux méthodes classificatoires qui n'apparaît pas dans la production finale. Elle concerne plus particulièrement les méthodes probabilistes de classification phylogénétique et leurs relations avec la cladistique et la phénétique. Le tableau 72 présente les extraits relatifs à ce thème.

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
437	Manuella	je sais pas si du coup les méthodes utilisées / on dit du coup	Développement du réseau conceptuel des méthodes classificatoires
438	Helena	cladistique phénétique / euh	Rappel des méthodes déjà placées dans la carte
439	Manuella	probabilisme on l'a déjà mis	Introduction dans la carte du concept nommé « probabilisme » pour désigner les méthodes probabilistes
440	Helena	non on ne l'a pas mis du coup	
441	Manuella	pas encore / c'est pas avec gradisme et évolutionnisme ?	Proposition de regrouper les méthodes probabilistes avec les concepts de gradisme et d'évolutionnisme
442	Helena	le probabilisme ?	Formulation d'un désaccord (ton utilisé)
443	Manuella	ah non non non	Retour en arrière sur la proposition formulée
444	Helena	non c'est avec la phénétique	Nouvelle proposition : associer méthodes probabilistes et phénétique
445	Manuella	enfin la cladistique **aussi**	Manuella pense qu'elles sont **également** liées à la cladistique, et pas seulement à la phénétique
446	Helena	euh non	Désaccord
447	Manuella	avec la cladistique le probabilisme	Insistance sur le lien cladistique - méthodes probabilistes
448	Helena	bah pour moi c'est surtout avec tu sais / les branches / où on met une notion de / je me souviens en cours avec lui (référence au cours de phylogénie précédant la séquence)	Début d'explication pas clair pour justifier la position
449	Manuella	c'était en lien avec la cladistique / je suis quasi sûre / alors comment on avait mis ça / euh	Manuella reste sur sa position dont elle affirme être très sûre, mais sans l'expliquer
491	Manuella	parce que là ça (« probabilisme" isolé, non encore relié à un autre concept) / ça on n'est pas sûrs encore / le truc il ne fonctionne pas quand on monte	Manuella indique que le désaccord autour des méthodes probabilistes n'est pas encore tranché « ça on n'est pas sûrs encore »
531	Manuella	et il [Burki] utilise le probabilisme	Association entre un auteur (Burki) et les méthodes probabilistes

532	Helena	du coup on le mettrait comme ça (rapprochant probabilisme de Burki)	Positionnement du nœud « probabilisme » en lien avec Burki (sans avoir tranché le positionnement théorique de ces méthodes par rapport à la phénétique et la cladistique)

Tableau 72 : les méthodes probabilistes et leurs relations avec la cladistique et la phénétique

Les méthodes probabilistes de classification phylogénétique, nommées « probabilisme » par les étudiantes, ne semblent pas comprises du point de vue de leur relation théorique avec les méthodes phénétique et cladistique. Ici, un désaccord entre les deux étudiantes apparaît nettement : Helena défendant une proximité avec la phénétique et Manuella avec la cladistique. Mais aucun argument convaincant n'est avancé pour appuyer la thèse et le désaccord reste maintenu. Cependant le lien est établi dans la carte entre Burki et méthodes probabilistes masquant cette difficulté conceptuelle apparue par l'analyse de la réalisation de la tâche.

- **Lien entre endosymbiose et « contexte de pensées / théorie de l'époque »**

Un réseau conceptuel relatif à la photosynthèse a été établi au sein de la branche de définition des végétaux. Dans ce réseau, la photosynthèse est mise en relation avec la présence de plastes dont l'origine est interprétée comme liée à l'endosymbiose de cyanobactéries. Lors de la construction du réseau portant sur les contextes de pensée, la relation avec la théorie endosymbiotique de l'origine des plastes est discutée (cf. tableau 73).

N°	Locuteur	Verbatim
574	Manuella	est-ce que contextes de pensée ou euh / est-ce qu'on parle des théories ? / y avait quoi comme théorie / tu sais dans la case quelles théories ont permis de
575	Helena	ah endosymbiose c'était surtout perte secondaire qui faisait débat
576	Manuella	il y avait quoi comme autre théorie ?
577	Helena	(silence) comme théorie ?
578	Manuella	est-ce que
579	Helena	ah comme théorie ? euh / bah y avait tout ce qui était cladistique et tout
580	Manuella	ouais / (propos non audible)
581	Helena	est-ce que contextes de pensée / **je peux mettre contexte de pensée euh théories / théories de l'époque** / j'appuie surtout moi / et **on peut mettre endosymbiose / et du coup faut garder un lien avec plastes**

Tableau 73 : relation entre « l'endosymbiose » et « les contextes de pensées / théories de l'époque »

Elles aboutissent à l'idée d'établir un lien entre le nœud « contexte de pensée / théories de l'époque » et « endosymbiose » en établissant une relation avec les plastes (581). Pourtant, à la fin de la séance, les étudiantes ne reviennent pas sur ce lien qui ne figure donc pas dans la production finale alors qu'elles en ont conscience. Cette absence est donc à mettre au compte du manque de temps ressenti à la fin de l'activité.

- **Suppression de certains concepts envisagés dans la liste initiale**

Plusieurs concepts ont été envisagés à l'issue du brainstorming initial et ont été finalement supprimés de la carte. Par exemple, il s'agit du concept de super-groupe. Helena justifie sa suppression de la carte car « c'est sa théorie à lui » (691), en désignant Burki. Autrement dit, le concept de super-groupe n'est pas nécessaire pour définir les conceptions des végétaux et leur évolution, mais il relève du positionnement théorique plus général de F. Burki, rejetant la notion de règne.

D'autres concepts sont également éliminés de la carte comme ceux de biodiversité, d'espèce ou encore de règne. Ils sont supprimés en fin de séance alors que le temps presse pour terminer la tâche. L'argument avancé par Helena (711) est « on va pas donner toutes les explications ». Ils sont donc jugés moins importants pour répondre à la consigne et relèveraient d'explications d'ordre secondaire.

La suppression de ces concepts constitue un indicateur de ce que les étudiantes jugent moins importants, après réflexion. Elle nous informe sur ce qui a été jugé en lien avec le problème à un moment de l'activité puis jugé hors du problème travaillé (cas du concept de super-groupe) ou bien d'ordre secondaire (cas de la biodiversité, de l'espèce et du règne).

5.4.4. Les contraintes liées à la nature de la tâche

L'activité des étudiants dépend de la manière dont ils comprennent la tâche ainsi que des contraintes liées à la nature même de l'activité, en l'occurrence construire une carte conceptuelle avec un logiciel donné (CmapTools), ainsi que des aspects pratiques comme la gestion du temps limité (1h30). L'analyse de ces différents aspects permet de mettre en perspective la production réalisée avec le cadre contraint dans laquelle elle a été effectuée.

- **Démarche de construction de la carte**

La démarche suivie apporte des informations intéressantes sur la manière dont les étudiants comprennent la tâche et comment ils s'y prennent pour la réaliser. Le binôme étudié a, dans un premier temps, listé les concepts qu'il pensait être en lien avec la situation-problème puis

les a groupé (cf. figure 91) et mis en réseau, en cherchant à caractériser la nature de la relation entre concepts. Les propos récapitulés dans le tableau 74 indiquent la démarche retenue.

N°	Locuteur	Verbatim
5	Manuella	est-ce qu'on met en commun nos
6	Helena	Ouais
7	Manuella	alors / moi c'est un peu éparpillé
8	Helena	moi aussi / tu veux qu'on les mette [direct dessus
9	Manuella	directement] et après
10	Helena	on essaye de
11	Manuella	de les ranger un peu de les classer
12	Helena	comme ça on voit si on a des trucs en commun / alors vas y dis-moi
97	Manuella	voilà est-ce qu'on essaie de ranger du coup un petit peu
458	Manuella	on a mis tous les termes ensemble / enfin tous les mots clés et on essaye de tous les ranger maintenant / voilà
700	Manuella	on va essayer de tout bien ranger

Tableau 74 : extraits relatifs à la démarche de construction de la carte

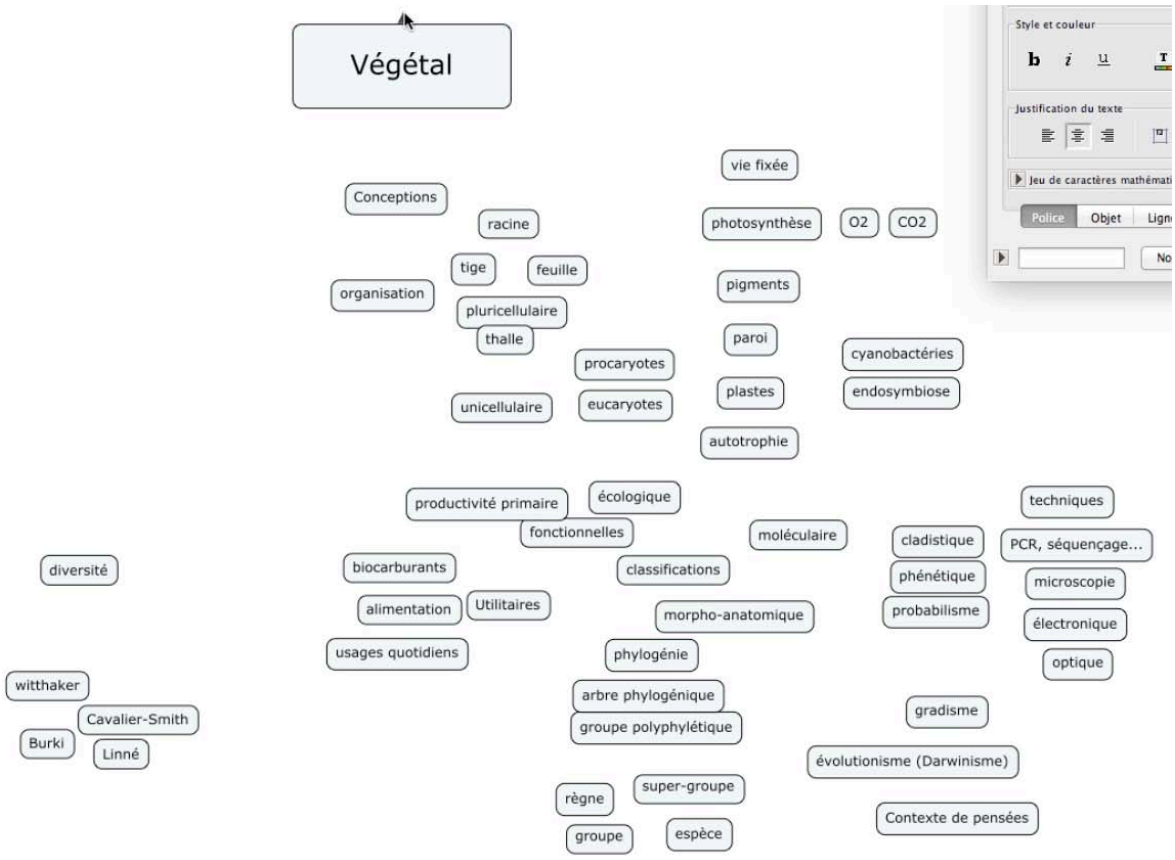


Figure 91 : état de la carte à 20' présentant l'ensemble des concepts groupés mais non reliés

D'autres binômes, tels que le groupe A3, ont eu une démarche différente. La figure 92 présente une version intermédiaire de la carte indiquant que la structure générale de la représentation graphique a été pensée avant de remplir les différents nœuds. Dans cette carte, l'évolution des idées occupe une place majeure.

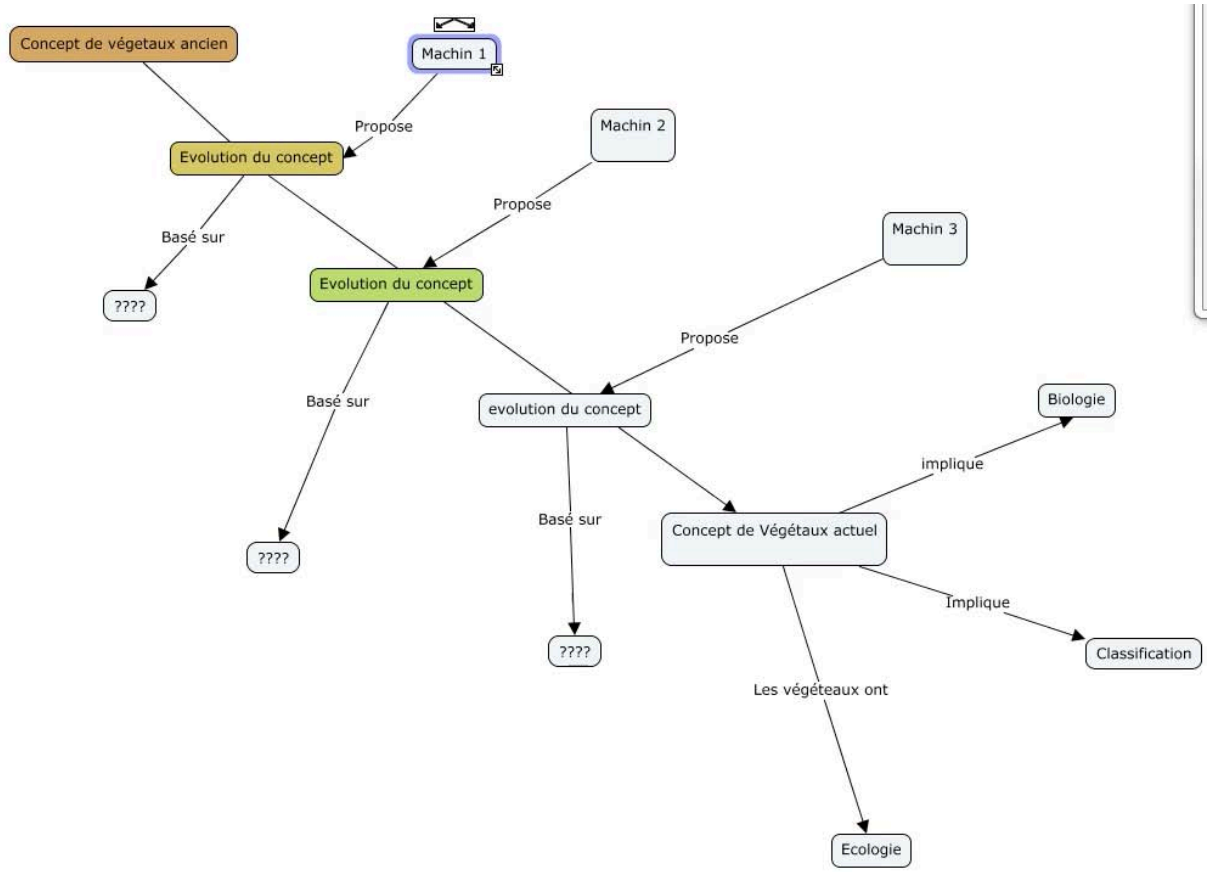


Figure 92 : état de la carte du groupe A3 à 43'

À l'issue de cette thèse, une perspective de recherche se dégage : passer d'une étude de cas à une étude à visée comparatiste. Il semble intéressant d'étudier l'effet de la démarche de construction de carte sur la manière dont est réalisée la carte et plus particulièrement sur la nature des réseaux conceptuels élaborés.

- **Contraintes liées à la gestion du temps**

La tâche devant être réalisée en un temps limité (1h30), la gestion du temps impose une contrainte pesant sur la réalisation de la carte conceptuelle. La discussion qui porte sur certains connecteurs a pu être différée pour gérer cette contrainte horaire, comme l'indique Manuella (333) : « on va d'abord faire les différentes conceptions et après on verra si on va mettre des liens / si on connaît des liens entre les différentes choses ». Le manque de temps a été formulé en fin de séance (comme l'indique le tableau 75), contraignant les étudiantes à

accélérer la fin du travail et les empêchant de revenir sur certains liens qui avaient été différés (« on verra plus tard »).

N°	Locuteur	Verbatim
651	Manuella	il est 18h05 (étonnée, la séance a démarré à 16h et est censée finir à 18h)
652	Helena	bah ouais
653	Manuella	ah merde je m'étais pas du tout rendue compte / c'est ouf ça
710	Manuella	on met / **de toute manière il faut faire ça vite fait / on peut plus** / là il est déjà 18 heures 10

Tableau 75 : propos indiquant le manque de temps ressenti

Ce problème de gestion du temps semble particulièrement sensible dans le cas de cette activité nécessitant la mobilisation de processus cognitifs de haut niveau (Chevron 2014).

- **Contraintes liées à la nécessité de produire une carte lisible**

La construction du réseau conceptuel n'est pas indépendante de la tâche de production d'une carte conceptuelle, à savoir d'un objet de communication qui se doit d'être organisé et lisible. Le tableau 76 indique que cette contrainte est prise en compte par les étudiantes.

N°	Locuteur	Verbatim
111	Manuella	on n'a qu'à mettre aussi conception / après je sais pas genre évolution des conceptions / je sais pas
112	Helena	sinon on part de concept des végétaux / et par exemple on part de Whittaker euh / Whittaker il pensait tel tel truc / machin il pensait tel tel truc
113	Manuella	henhen (au sens de oui) bah / tu crois ?
114	Helena	je je sais pas
115	Manuella	**parce que du coup on remet où photosynthèse / ça va être partout tu vois**
184	Helena	sinon on met les conceptions après c'est pas grave / on est est défini selon les conceptions / on met les différentes **/ non ça va faire répétition à chaque fois**

Tableau 76 : extraits relatifs à la contrainte de produire une carte lisible

À deux reprises, et par souci de lisibilité, une suggestion de structure de la carte a été proposée puis abandonnée. En effet, Helena propose d'organiser les différentes conceptions des végétaux selon les propositions des différents scientifiques. Mais comme la photosynthèse est prise en compte dans plusieurs systèmes classificatoires, Manuella (115) considère que cela risque d'entraîner des répétitions, dont on peut penser qu'elles nuiront à la clarté de la carte. Cette même préoccupation de l'évitement de répétitions est formulée par Helena (184).

- **Contraintes ergonomiques liées à l'utilisation du logiciel**

Notre recherche ne permet pas d'évaluer de quelle manière l'utilisation du logiciel CmapTools contraint l'activité cognitive des étudiants et de caractériser précisément l'ergonomie logicielle. D'autres études portant sur l'utilisation de ce logiciel en contexte de formation universitaire révélèrent une perception positive des étudiants concernant la facilité d'utilisation du logiciel[183].

Lors de cette séance, les étudiants utilisèrent pour la première fois ce logiciel. Ils ont par conséquent consacré une part de leur temps (non évaluée dans le cadre de cette recherche) à prendre en main celui-ci. Par exemple, Helena et Manuella se sont interrogées sur la présence de flèches à l'extrémité des traits reliant un connecteur et un concept fils : « en fait on a un problème parce qu'à chaque fois / des fois il nous met des flèches / des fois il nous en met pas » (Helena, 693). Sans le caractériser précisément, l'utilisation de CmapTools ne nous a pas semblé poser de difficultés majeures : la prise en main s'étant révélée relativement aisée. À la fin de l'activité, Manuella formule un commentaire attestant de sa perception positive de l'utilisation du logiciel : « de toute manière il nous a donné ses diapos (de présentation du *concept-mapping*) pour qu'on puisse revoir ce site (CmapTools) / parce c'est intéressant effectivement » (740).

Il est cependant certain qu'une seconde utilisation du logiciel permettrait d'éviter de consacrer du temps à la découverte des fonctionnalités pratiques du logiciel et, de plus, permettrait de se focaliser uniquement sur les aspects conceptuels de l'activité.

5.4.5. Bilan sur les apports de l'étude de la construction d'une carte conceptuelle

Nous voudrions faire ici le bilan de ce qu'apporte l'étude la construction d'une carte conceptuelle permettant de contrôler les inférences sur le raisonnement des étudiants. L'analyse de la production finale apporte un premier niveau de compréhension du sujet contextualisé à la situation proposée. Pour cela, nous avons étudié la carte en utilisant une grille établie par une analyse *a priori* de la tâche (cf. tableau 60). Elle permet d'identifier des questions (cf. tableau 61) et de formuler des hypothèses portant sur le raisonnement et les difficultés rencontrées, qu'il convient d'interroger grâce à l'analyse de l'argumentation développée durant la construction de la carte. L'étude du processus de réalisation de la carte a permis d'examiner les inférences réalisées à partir de la production concernant les

[183] « In terms of usability, we can thus say that the appreciation of the learners is rather positive »(De Lievre, Decamps, Dujardin, & Depover, 2010, p. 4).

raisonnements des étudiants et de mieux comprendre certains aspects de la carte en décalage avec les savoirs scientifiques travaillés ou bien ambigus (choix de certains mots par exemple). De plus, certains concepts ou liens conceptuels peuvent être absents de la carte produite. L'étude de la construction de la carte permet de questionner les raisons de cette absence de la production finale et, également, de distinguer quatre cas de figures présentés en figure 93.

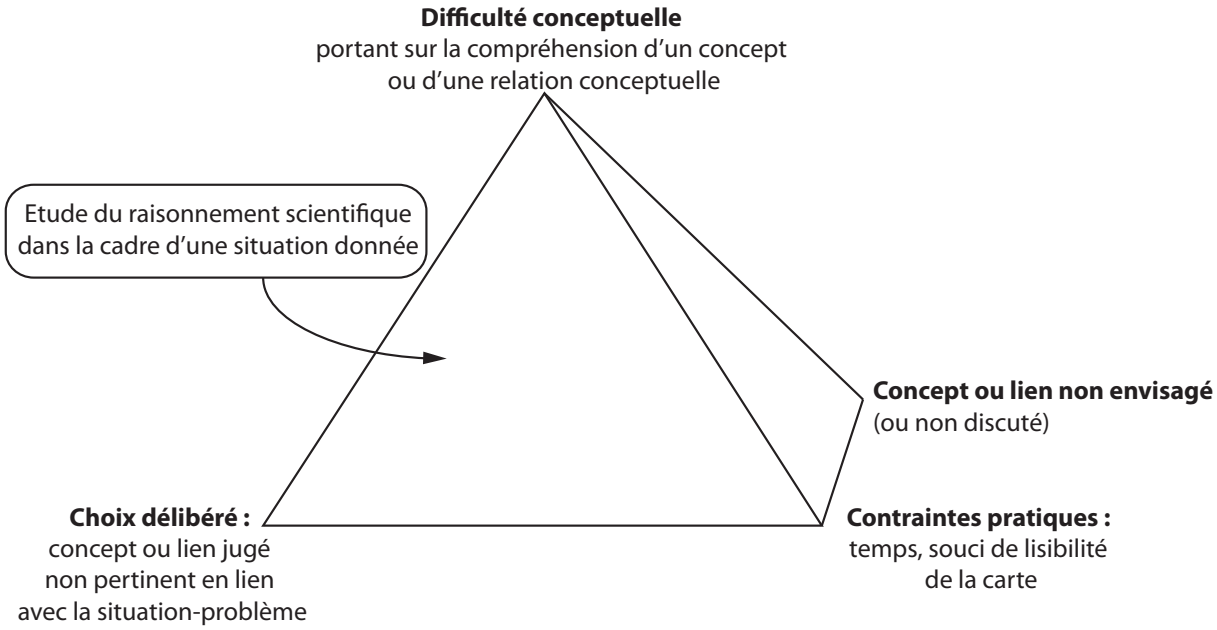


Figure 93 : les raisons de l'absence d'un élément de discours ou d'un lien conceptuel

Les éléments de discours ou liens absents peuvent ne pas avoir été envisagés ou discutés par les étudiants. Mais ils peuvent aussi faire l'objet d'un échange argumenté et leur absence a alors trois explications possibles. Elle peut être le fruit d'un choix délibéré, le concept ou le lien étant jugé en dehors du problème travaillé dans le cadre de la situation-problème. Mais elle peut aussi révéler une difficulté conceptuelle comme, par exemple, la difficulté à clarifier précisément la nature de certains liens conceptuels. L'absence de certains concepts ou liens peut également être liée à des raisons pratiques, notamment le problème de manque de temps empêchant de revenir sur certains choix qui n'ont pas été finalisé ou les contraintes liées à la nature de la tâche dont celle de produire une carte lisible.

Le tableau 77 présente différents exemples tirés de notre étude de cas.

	Exemples
Choix délibéré	• Absence de citation de Gasparini car l'article ne portait que sur le phytoplancton et pas l'ensemble des végétaux (407)
Difficultés conceptuelles	• Absence de lien entre les différentes classifications et les définitions des végétaux (128-158)
Contraintes pratiques (manque de temps, souci de lisibilité de la carte)	• Absence de lien entre Whittaker et classification fonctionnelle / écologique (236) • Absence de lien entre endosymbiose et « contexte de pensées / théorie de l'époque » (581) • Absence de lien entre les techniques et la classification phylogénétique (394)

Tableau 77 : exemples illustrant les trois cas d'absence de concepts ou liens conceptuels ayant fait l'objet d'un échange argumenté (les numéros indiquent les tours de parole du débat)

Nous avons enrichi la carte avec les différents liens conceptuels discutés par les étudiantes, colorés en rouge (cf. figure 94).

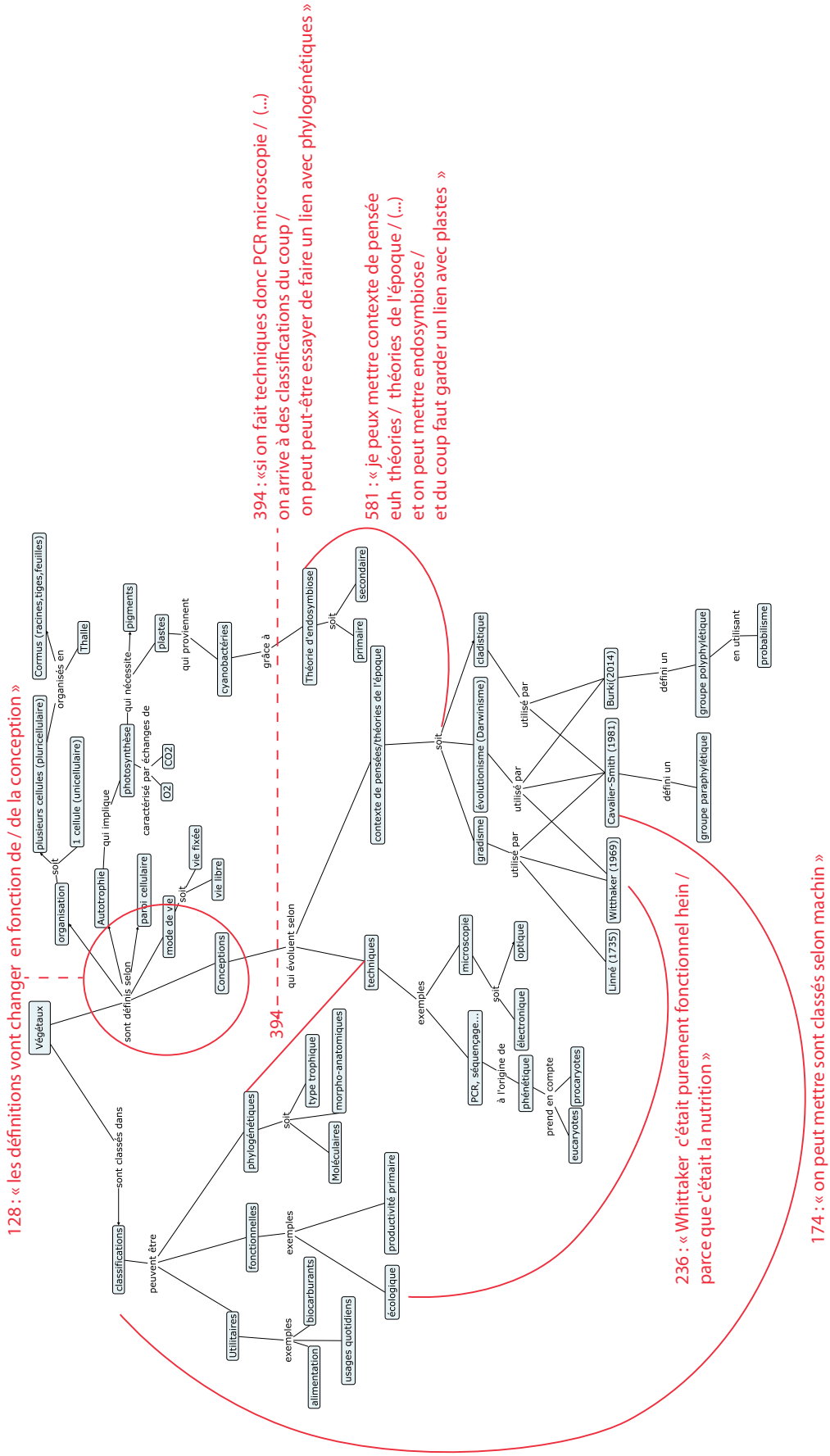


Figure 94 : Carte conceptuelle du groupe A7 avec ajout (en rouge) de liens discutés lors de la construction de la carte

Enfin, l'analyse de la construction de la carte apporte au chercheur des informations sur la confiance accordée à certaines branches grâce à différents modalisateurs comme « bah c'est pas mal » (729) ou à l'inverse « ah je sais plus / si c'est ça » (715). Cela permet de relativiser le poids à accorder à certaines parties de la carte.

Ainsi, l'étude de la construction de la carte apparaît comme une précieuse source d'informations complétant l'étude de la production finale afin d'éviter les surinterprétations. Elle ne remet pas à cause la pertinence de l'étude des cartes conceptuelles mais fournit de nombreux éléments permettant de mieux comprendre la production réalisée dans son contexte et de contrôler d'avantage les inférences que le chercheur doit nécessairement réaliser pour interpréter la production en termes de représentation. Judicieusement, C. Orange et D. Orange-Ravachol (2013, p. 51)nous rappellent que la question de l'interprétation des productions est intrinsèque à l'activité du chercheur qui s'intéresse aux modèles explicatifs mobilisés par les apprenants, comme nous l'avons discuté lors du chapitre 2 dans le cadre d'autres types de productions (questionnaire).

Notre recherche propose donc une stratégie basée sur l'étude du processus de construction permettant de contrôler au maximum les inférences que l'on peut réaliser à partir de productions particulières, telles les cartes conceptuelles. Cette étude de cas illustre toute l'influence des conditions de réalisation des productions, notamment l'importance cruciale de la situation-problème mais aussi des nombreuses contraintes liées à la nature de l'activité, comme produire une carte lisible en un temps donné avec le logiciel imposé et qui présente ses propres contraintes ergonomiques.

Par ailleurs, cette méthode de recherche nous apporte des informations complémentaires de celles qui ont été dégagées par l'analyse du débat scientifique réalisé à l'occasion de la séance précédente. Elle permet d'avoir des productions pour chaque étudiant, impliqué ici dans un travail en dyade. Or il est apparu lors du débat collectif que la prise de parole est très inégale selon les étudiants (cf. figure 83), et ne permet pas d'accéder au raisonnement mobilisé par chaque étudiant. Croiser l'analyse du débat avec la production de cartes conceptuelles est donc une source intéressante d'informations collectives et individuelles.

5.4.6. Étude de la problématisation développée au cours de la construction de la carte conceptuelle

Nous cherchons à déterminer dans quelles mesures l'étude de la construction de la carte permet d'étudier la construction de problèmes par les étudiants ? Pour répondre à cette question de recherche, commençons par l'étude d'un exemple.

- **Étude d'un exemple : le problème de la définition des végétaux par leur mode de nutrition et celui de l'origine évolutive des plastes**

La figure 95 présente la branche de la carte faisant l'objet de la présente analyse. Elle présente deux problèmes distincts : celui de la définition fonctionnelle des végétaux basée sur leur mode de nutrition et celui de l'origine évolutive des plastes.

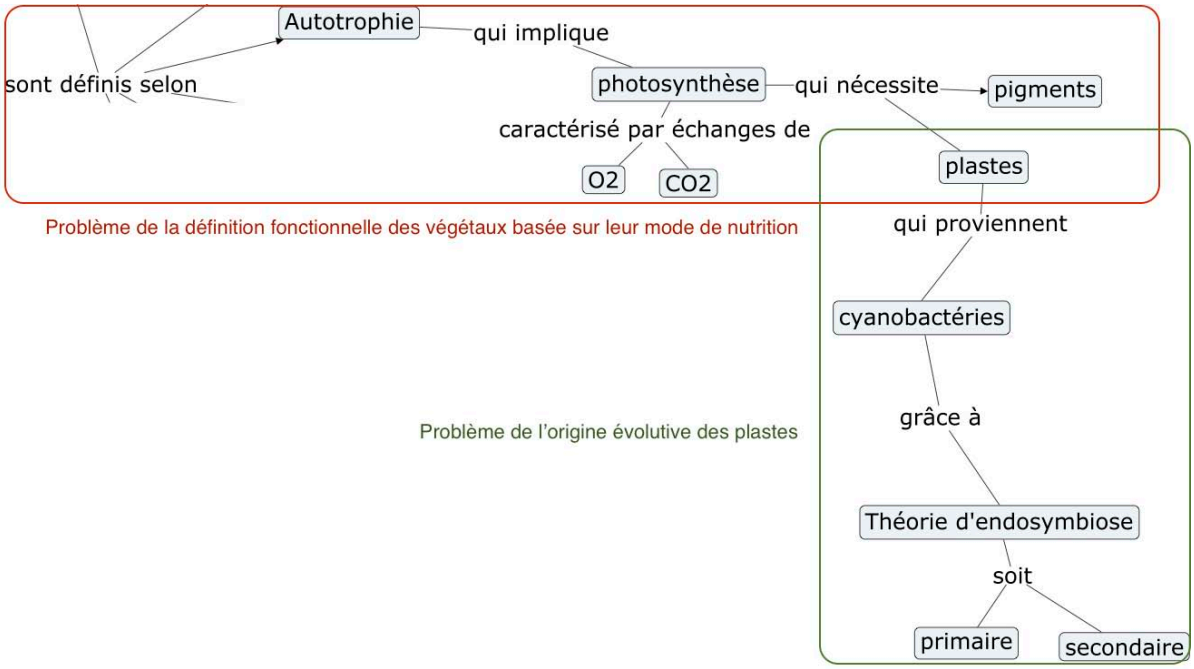


Figure 95 : branche de la carte faisant l'objet de la présente analyse (les autres branches ont été masquées)

L'étude argumentative présentée dans le tableau 78 vise à comprendre la construction de ce réseau conceptuel de façon à examiner si l'on peut affirmer qu'il y a problématisation. Construire un problème implique deux dédoublements : entre faits et idées, d'une part, et entre contraintes et nécessités[184], d'autre part (Fabre & Orange, 1997; Lhoste & Peterfalvi, 2009).

[184] « Est nécessaire ce dont le contraire est impossible ; contingent ce dont le contraire est possible » (Orange 2002, p. 38)

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
16	Helena	photosynthèse / **du coup avec ça** moi j'ai mis plastes pigments	Mise en relation d'un concept formel du registre théorique, la photosynthèse, avec des concepts catégoriels du registre empirique, plastes et pigments [sans explicitation de la nature du lien conceptuel]
522	Helena	photosynthèse avec ça (O_2 et CO_2)	Regroupement de la photosynthèse avec les gaz O_2 et CO_2 (registre empirique)
547	Manuella	alors sont définis selon euh / comment on dit / euh / leur mode trophique	**Problème de définition** selon une propriété fonctionnelle, le mode de nutrition
548	Helena	ouais	
549	Manuella	leur mode trophique on dit ? (…)	
550	Helena	type trophique	
560	Manuella	soit mode / mode / pas **mode de nutrition** / c'est bizarre non ?	Discussion sur le terme à retenir dans la carte : type tropique, mode de nutrition et au final autotrophie
561	Helena	bah **type trophique** sinon / je remets type trophique	
562	Manuella	oui voilà	
563	Helena	type trophique / et du coup euh / là je mets direct **autotrophie** tant pis / sont définis selon	
564	Manuella	leur autotrophie	
565	Helena	autotrophie / qui **implique**	**« Qui implique »** : explicitation de la relation conceptuelle entre autotrophie (type trophique) et photosynthèse (voir métabolique / processus assurant l'autotrophie)
566	Manuella	voilà **implique** c'est bien	
567	Helena	**implique**	
568	Manuella	la photosynthèse	
569	Helena	je vais mettre photosynthèse / qui **implique** elle-même des pigments / des plastes // qui **nécessite** (connecteur entre photosynthèse et pigments)	Relation conceptuelle entre photosynthèse et les pigments / plastes : qui implique puis **qui nécessite (construction d'une nécessité?)**
570	Manuella	ouais	
571	Helena	qui **nécessite** / pigments /plastes et bah voilà / et du coup	
572		**ça c'est la théorie de l'endosymbiose**	**Changement de problème** : problème

	Manuella		de l'origine des plastes => mobilisation de la théorie de l'endosymbiose
582	Manuella	ouais / euh / qui nécessitent plastes	Origine **cyanobactérienne** des plastes et multiplicité des phénomènes d'endosymbiose (primaire et secondaire
583	Helena	qui provient / qui **proviennent**	
584	Manuella	ça c'est le nombre ouais	
585	Helena	qui **proviennent** de / ça (**cyanobactéries**)	
586	Manuella	là / endosymbiose	
587	Helena	qui **proviennent de ça (cyanobactéries)** / grâce (rire) / je bloque sur grâce / grâce à / grâce à endosymbiose / on peut mettre primaire ou secondaire (rire)	
630	Helena	voilà ça (photosynthèse) / **caractérisé par des échanges** (O2 et CO2)	Choix du **mot de liaison** « caractérisé par des échanges de » pour lier photosynthèse et O_2 / CO_2

Tableau 78 : analyse relative à la branche incluant l'autotrophie

Le tableau 78 révèle une dissymétrie notable entre l'argumentation développée pour les deux problèmes : fonctionnel (mode de nutrition) et historique (origine des plastes). En effet, l'argumentation qui porte sur le mode de nutrition met en relation des données empiriques (présence de plastes, de pigments, réalisation d'échanges gazeux d'O_2 et de CO_2) avec des concepts (autotrophie et photosynthèse). Concernant l'origine évolutive des plastes, le modèle explicatif (la théorie de l'endosymbiose) est avancé mais sans aucune donnée empirique, comme par exemple la présence de membranes plastidiales multiples ou la présence de matériel génétique de type bactérien. Ainsi, sans un dédoublement entre faits et idées, il n'est pas possible d'affirmer que le problème de l'origine des plastes soit construit durant cette activité. Dans ce cas, nous ne pouvons pas dire si le savoir mobilisé par les étudiants est de nature propositionnelle ou bien problématisée, pour reprendre la distinction réalisée par Fabre (2009) à la suite de M. Meyer entre « le savoir des questions et le savoir des réponses ».

> « Savoir questionner n'est pas savoir répondre mais c'est pouvoir anticiper la forme que devra avoir la réponse. Pour que la réponse soit une bonne réponse, il faut en effet qu'elle contienne les présupposés de la question » (Fabre, 2009, p. 26).

En ce qui concerne le problème fonctionnel du mode de nutrition, s'il y a bien mise en relation des registres empiriques et théoriques, il reste à examiner s'il y a construction de nécessités pour attester d'un dédoublement entre connaissance assertorique et apodictique. La présence de pigments et de plastes est qualifiée de *nécessaire* pour assurer la photosynthèse (cf. tableau 78, 569-571).

Cette mise en relation suffit-elle pour affirmer que le savoir représenté dans la carte est de nature apodictique ? Il est difficile de l'affirmer avec certitude car la raison de la nécessité de pigments n'est pas indiquée, à savoir la nécessité de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique. Cette nécessité fonctionnelle étant implicite, nous pouvons supposer qu'il y a problématisation mais sans pouvoir le démontrer de façon certaine. Nous pouvons supposer qu'il y a ébauche de construction d'une nécessité mais dont les tenants et aboutissants ne sont pas explicités.

- **Problématisation et construction de cartes conceptuelles**

➢ **Un bilan en demi-teinte**

La situation-problème correspondant à la tâche de construction de carte conceptuelle engage les étudiants sur deux types de problème : d'une part, celui de la caractérisation multiple d'un groupe biologique, dépendant étroitement du type de classification et d'autre part le problème épistémologique de l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux. Nous laisserons de côté le second problème, très particulier en ce sens qu'il s'agit d'un problème de philosophie et d'histoire des sciences et non d'une question biologique. Le premier problème implique de mettre en relation les activités de classification biologique et de définition d'un taxon, qui sont intimement liées. Or l'étude de cas de la carte A7 révèle un décalage entre une définition absolue des végétaux basée sur certains caractères, dont l'autotrophie ou la paroi et la catégorisation de différentes classifications biologiques, phylogénétiques, fonctionnelles et utilitaires (cf. figure 88). Les deux étudiantes n'aboutissent pas dans cette mise en relation entre définition et classification qu'elles envisagent pourtant (« mais justement la définition elle change en fonction des conceptions », Manuella, 158, cf. tableau 63). Ce résultat nous semble pouvoir être interprété comme une difficulté à problématiser la multiplicité des définitions des végétaux selon les classifications. Plusieurs interprétations, non exclusives, peuvent être avancées. Tout d'abord, notons que la tâche est éminemment complexe sur un plan conceptuel car elle nécessite une prise de recul biologique importante sur le processus de construction d'un groupe biologique et son lien avec les différentes classifications

biologiques. Le temps contraint est apparu comme un facteur limitant (cf. tableau 75). Enfin, il semble complexe d'envisager l'absence de certains caractères comme la photosynthèse parmi les végétaux (cf. tableau 66). Rappelons que lors de la séance précédente, durant le débat, Manuella et Helena défendaient une thèse pouvant renvoyer à une position essentialiste : « forcément les végétaux existent pour lui [Burki] on est en 2014 » (cf. tableau 47). Ce type de raisonnement pourrait éclairer cette difficulté dans la réalisation de la carte conceptuelle.

Par ailleurs, dans la réalisation de la tâche, toutes les actions ne sont pas explicitées quand les étudiantes sont d'accord. Il y a donc beaucoup d'implicites rendant très délicate l'analyse de la problématisation. C. Orange nous rappelle que les implicites peuvent correspondre à des évidences partagées que les étudiantes ne jugent pas nécessaires de lever.

> « Ces implicites ne sont pas la marque d'une faiblesse argumentative des élèves : toute argumentation s'appuie finalement sur des évidences partagées par la communauté à laquelle elle s'adresse ; il ne peut en être autrement. » (Orange, 2012bb, p. 75)

Le cadre de la situation analysée (travail en dyade), le rôle de tiers n'est pas ou peu présent. Comme nous le signale C. Orange (2012b, p. 63), le tiers joue un rôle essentiel dans l'avancée de la problématisation, notamment par la caractérisation des arguments et des thèses en présence, la formulation de la question. L'absence d'intervention de l'enseignant ou d'étudiants extérieurs au groupe, endossant souvent le rôle de tiers, ne permet qu'un accès partiel aux problèmes construits.

Cette étude de cas fait donc ressortir que le dispositif didactique mis en œuvre ne permet pas à lui seul d'accéder à la problématisation développée par les étudiants.

- **Perspective**

Nous proposons de faire évoluer le dispositif en faisant suivre la construction de la carte par un débat portant sur les différentes cartes conceptuelles réalisées. Cette nouvelle situation devrait favoriser l'explicitation de certains choix conceptuels et comparer différents possibles. La discussion autour de plusieurs possibles nous semble être davantage en mesure de travailler la problématisation. En effet « construire le problème est plus que le représenter ou le modéliser ; c'est s'engager dans un processus rationnel correspondant à une exploration du possible, de l'impossible et du nécessaire » (Orange, 2005, p. 8). Un tel dispositif didactique se rapproche donc des méthodologies développées au sein de la communauté scientifique étudiant la problématisation, faisant une place centrale au débat scientifique en classe. Mais il s'en distingue par la centration du débat sur l'objet « carte conceptuelle » dont la spécificité

réside dans les mises en relations conceptuelles. Focaliser le débat sur les réseaux conceptuels nous semble favorable à la construction de savoirs scientifiques dépassant le caractère local des exemples travaillés et permettant d'atteindre un degré plus élevé d'abstraction et de généralisation. En ce sens, cette proposition nous semble présenter certaines similitudes avec l'utilisation de prototypes d'explications, les « caricatures » (Orange, 2010, 2014), bien que ces dernières soient réalisées par les chercheurs (et non les élèves) pour favoriser la construction de savoirs problématisés par les élèves (cf. figure 96).

> « En s'appuyant sur les productions écrites des groupes (affiches), les chercheurs ont construit quatre prototypes d'explications (« caricatures ») du mouvement du bras qui semblent présentes dans la classe, en les limitant à la question d'organisation du squelette. » (Orange 2014, p. 493).

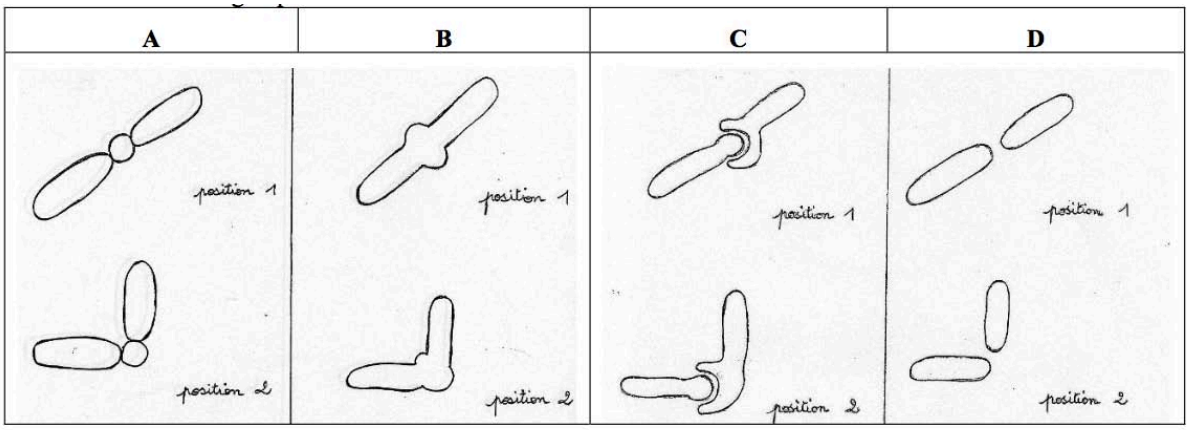


Figure 96 : les quatre « caricatures » soumises à la critique de la classe. Reproduit de Orange (2014, p. 493)

C. Orange explique ainsi l'intérêt de l'utilisation de « caricatures » pour accéder à des savoirs problématisés, ayant un certain degré d'apodicticité.

> « L'utilisation de caricatures pour porter des débats scientifiques en classe et conduire à la construction des nécessités constitutives des savoirs visés, avait pour but initial de permettre aux élèves de produire des argumentations écrites. Elle semble en outre présenter un **double intérêt pour la problématisation** : d'une part les caricatures, choisies pour permettre la discussion de chacune des nécessité visées, provoquent un plus grand nombre d'argumentations fonctionnelles et inter-objectales ; d'autre part, les schémas discutés ne sont pas portés par un auteur ce qui semble favoriser **les argumentations épistémiques** au détriment de la défense de ses propres idées. Tout cela va dans le sens **d'une secondarisation des productions argumentatives et donc d'une problématisation scientifique.** » (2014, p. 499), *c'est nous qui soulignons*.

En favorisant les argumentations épistémiques, l'analyse des « caricatures » favorise la secondarisation[185] du discours des élèves et ainsi la problématisation. Les cartes conceptuelles ont en commun une centration épistémique forte. Les « caricatures » ou les cartes conceptuelles pourraient avoir en commun de générer une même dynamique de décontextualisation et recontextualisation, en obligeant les étudiants à s'extraire de l'ici et du maintenant du cas étudié. En effet, la construction de la carte ayant une fonction de bilan oblige les étudiants à décontextualiser en prenant de la distance avec les exemples travaillés en formation pour créer un réseau conceptuel. Mais on peut s'attendre à ce que le débat sur les cartes nécessite de recontexualiser certains liens conceptuels pour argumenter les raisons des choix réalisés. Un débat centré sur les liens conceptuels et leurs fondements pourrait être de nature à favoriser la problématisation, comme c'est le cas pour les « caricatures », grâce à la dynamique argumentative qu'elle chercherait à produire. Une nouvelle perspective de recherche s'ouvre donc à l'issue de cette première expérimentation.

Une condition de possibilité de la construction de savoirs problématisés par l'utilisation de cartes conceptuelles consiste en une exigence quant à la mise en relation entre faits et idées et quant à l'établissement de la dimension apodictique des nécessités construites. Cette attention particulière pourrait se décliner dans la consigne de réalisation de la carte conceptuelle et dans le pilotage du débat.

[185] La **secondarisation** est définie ainsi dans le glossaire de C. Orange (2012, p. 132) : « un des buts de l'école étant de faire accéder les élèves à des genres seconds de discours, la secondarisation correspond au processus de transformation des usages langagiers initiaux des élèves, relevant généralement de genres premiers, en discours allant vers les genres seconds (Jaubert & Rebière, 2005 ; Jaubert, 2007). »

« Bakhtine, dans son étude des **genres discursifs** (1984), distingue les genres premiers et les genres seconds. Les genres premiers sont ceux des *«échanges spontanés qui régulent la vie de tous les jours »* et qui sont *« liés à l'action et tributaires des conditions de leurs usages »* (Jaubert & Rebière, 2002). On peut donner comme exemple la conversation courante. Par opposition, les genres seconds permettent *« de mettre à distance, d'objectiver, de reconfigurer l'activité dans laquelle le locuteur est engagé, c'est-à-dire de l'arracher de son contexte* » (Ibidem) ; ce sont les genres de la plupart des textes écrits mais aussi des discours préparés ou des synthèses proposées par l'enseignant en fin de cours. Un texte de savoir est nécessairement de genre second » (2012, p. 129-130).

6. Conclusion générale sur notre reconstruction didactique

Notre recherche s'est organisée autour de trois pôles de questions de recherche qui vont structurer le bilan de l'expérimentation didactique. Sans reprendre l'ensemble des conclusions partielles formulées précédemment, certains points jugés essentiels sont mis en relief dans cette section.

6.1. Conclusion sur l'étude du raisonnement et l'image de la nature de la science des étudiants

L'attention sera portée successivement sur le raisonnement des étudiants relatif aux principes associés aux différentes classifications biologiques, puis sur les différents obstacles mis au travail et enfin sur l'image de la nature de la science mobilisée par les étudiants durant la reconstruction didactique.

6.1.1. Les principes associés aux différentes classifications

Une hypothèse forte concernant l'usage de l'homologie structure notre conception de séquence. En effet, les différentes classifications biologiques se distinguent notamment par l'usage qu'elles font de l'homologie. Comprendre la pluralité d'un groupe biologique selon les différentes classifications - en l'occurrence le groupe des végétaux - passe par le repérage des différents usages de l'homologie dans les différents articles. Notre étude a révélé que les étudiants faisaient un recours inopportun à une hypothèse d'homologie dans un contexte fonctionnel (extraits d'articles d'écologie). La dissonance entre les propos des étudiants et le mode de raisonnement propre à une classification fonctionnelle n'a pas été perçue par les étudiants au cours du débat.

Concernant l'article de T. Cavalier-Smith, un phénomène émergent est apparu lors de la discussion sur la non-monophylie des végétaux pour cet auteur. Durant cet épisode, la problématisation réalisée par les étudiants était en décalage avec celle de l'auteur dans son article (cf. figure 47 et tableau 44). Les étudiants construisent la nécessité de la non-monophylie des végétaux au regard de l'absence de photosynthèse chez certains organismes appartenant au groupe des végétaux (au sens de Whittaker), constituant une contrainte empirique pour leur problématisation.

> « Comme tous ne le font pas c'est pas un caractère [parlant de la photosynthèse] qui pourra / qui pourra les regrouper dans un groupe monophylétique » (466).

Ils utilisèrent alors un registre explicatif mêlant des principes phylogénétiques (comme n'accepter comme valides que des groupes monophylétiques) et des principes qui relèvent d'une classification fonctionnelle (comme regrouper des espèces partageant toutes une même fonction). Nous assistons alors à une confusion entre les principes spécifiques des classifications phylogénétiques et fonctionnelle, en particulier celle de l'intégration du temps en phylogénie autorisant des pertes secondaires de caractères acquis ancestralement. Ainsi, notre recherche a permis de caractériser la difficulté des étudiants à prendre en charge les principes spécifiques de chaque classification dans le contexte approprié, fonctionnel ou phylogénétique (cf. figure 74). Enfin l'analyse du débat a montré à plusieurs reprises un déficit dans la compréhension des fondements de la méthode cladistique, notamment l'importance de la polarisation des caractères.

6.1.2. La mise en jeu d'obstacles épistémologiques et didactiques

Le bilan des différents obstacles qui ont été travaillés spécifiquement dans le cadre de la reconstruction didactique (cas du gradisme) ou qui ont été inférés à partir du discours des étudiants est dressé à présent.

- **La pensée gradiste**

La pensée gradiste constitue un obstacle épistémologique et a été largement discuté concernant son actualisation historique chez les différents systématiciens étudiés (cf. p. 242). En faisant travailler les étudiants sur deux classifications mobilisant le gradisme, l'objectif est d'endosser une posture critique concernant un mode de pensée très commun auquel, dans certaines situations, des étudiants ont eux-mêmes recours (cf. p. 133). Si le débat a montré que le gradisme était aisément critiqué dans les articles de Whittaker et Cavalier-Smith, l'étude de la construction de la carte conceptuelle révéla que les deux étudiantes réduisaient le gradisme à l'idée d'échelle des êtres et de degré de complexité, sans y associer une pensée évolutionniste, comme l'indique le lien entre Linné et gradisme. Ce résultat suggère de formaliser davantage la caractérisation du gradisme pour que les étudiants comprennent mieux le mélange entre pensée évolutionniste et une forme de pensée scaliste existant également dans un cadre fixiste.

- **Pensée typologique et essentialiste**

➢ **La photosynthèse comme critère absolu de définition des végétaux**

Les cartes conceptuelles A7 et B8 présentent un paradoxe : les végétaux sont définis par la photosynthèse de manière « absolue » alors que d'autres branches de la carte indiquent l'existence d'une multiplicité de conceptions (cf. figure 77 et figure 88). L'étude de cas de la construction de la carte A7 indiquait également cette difficulté (cf. tableau 66). La photosynthèse est alors envisagée comme un critère absolu de définition des végétaux, un caractère nécessaire (au sens aristotélicien) pour définir les végétaux. Il nous semble qu'elle présente un lien avec la difficulté à considérer l'orobanche comme non végétale lors de l'étude par questionnaire. Nous formulons l'hypothèse que ce mode de raisonnement typologique (ou essentialiste au sens épistémologique et méthodologique) pourrait constituer un obstacle à la conception phylogénétique d'un groupe au sein duquel un caractère peut disparaître secondairement.

➢ **« Forcément les végétaux existent ! »**

Le débat sur la nature du groupe des végétaux dans la classification de F. Burki s'est révélé particulièrement intéressant : il a donné lieu à un épisode fortement argumentatif durant lequel plusieurs thèses s'opposèrent (cf. figure 80 et figure 82). Une thèse a consisté à plaquer une définition *a priori* des végétaux, pourtant absente de l'article de Burki ; « forcément les végétaux existent pour lui » (668). Cette définition correspond d'ailleurs à la conception fonctionnelle et cellulaire (CFC) qui domina largement lors de l'enquête à l'échelle nationale. Il nous semble que cette thèse se base sur une pensée de type essentialiste (au sens ontologique). Malgré le débat, le désaccord persista et les étudiants défendant cette thèse restèrent sur leur position, soulignant l'une des caractéristiques de l'obstacle : sa résistance.

- **Association entre phénétique et caractères moléculaires d'une part et entre cladistique et caractères morpho-anatomiques d'autre part : un obstacle didactique ?**

Durant le débat et dans plusieurs cartes conceptuelles, l'utilisation des caractères moléculaires reste associée à la méthode phénétique et non à la méthode cladistique. Cette difficulté récurrente est, peut-être, au moins pour une part, le produit de l'enseignement. Il constituerait alors un obstacle d'origine didactique. Les exemples classiquement utilisés dans l'enseignement et les manuels pour la méthode cladistique sont des caractères morpho-

anatomiques. La méthode de phénétique UPGMA est largement enseignée en licence. Il est donc probable que les étudiants associent un type de caractère à un type de méthode alors que l'enjeu majeur de la distinction se situe ailleurs, à savoir dans l'usage de l'homologie avec polarisation des caractères en cladistique.

Notons que le macrocentrisme et la pensée catégorielle qui ont été mobilisés par les étudiants dans leurs réponses au questionnaire de l'enquête initiale n'ont pas été débattus lors de la reconstruction didactique. Dressons à présent une synthèse concernant nos questions de recherches portant sur l'image de la nature de la science.

6.1.3. L'image de la nature de la science (NoS)

Notre étude met davantage l'accent sur la dimension épistémologique que sur la dimension sociologique de la science. Le débat portant sur les articles scientifiques s'est révélé très fécond pour mettre au jour certaines facettes de l'image de la nature de la science que mobilisent les étudiants dans le contexte étudié. Le tableau 56 (cf. p. 373) présente les différentes caractéristiques des savoirs et de l'activité scientifique qui furent l'objet du débat. Certaines caractéristiques ont été particulièrement discutées car elles constituaient des items de la grille d'analyse des articles et de la grille de bilan sur les trois articles de systématique des Eucaryotes.

En particulier, nous nous devons de souligner la perception des controverses. Elle fut facilitée par le choix des articles, qui rendaient particulièrement visibles les oppositions des auteurs vis-à-vis des classifications antérieures. La perception de cette caractéristique de la science est importante car la controverse constitue « le lot commun de la fabrication de savoirs, en tant qu'elle est structurante parce qu'au cœur des pratiques ordinaires et nécessaires de la science » (Pestre, 2007, p. 30).

Le regard porté sur les différentes délimitations du groupe des végétaux dans les classifications successives a permis de travailler sur la dimension provisoire des savoirs scientifiques, ce qui constitue, sur un plan épistémologique, une de leurs caractéristiques majeures.

La perception du lien au problème scientifique des deux grands types de classifications fonctionnelle et phylogénétique est un objectif essentiel de notre reconstitution didactique. Si la conception phylogénétique est présente dans toutes les cartes (exceptée la B3, qui constitue un cas très particulier), la conception fonctionnelle /écologique est, quant à elle, présente dans 9 cartes sur 13 (soit 69 %). Cette dualité de problème est donc perçue très largement lors de l'activité finale. Mais il existe cependant trois cartes sur treize qui ne mobilisent pas les deux

types de classifications différentes permettant d'expliquer la multiplicité de conceptions du groupe des végétaux.

Les étudiants perçurent très facilement l'importance des techniques dans l'évolution des idées, comme l'ont montré le débat et les cartes conceptuelles dans lesquelles les techniques furent citées dans la totalité des cas. En comparaison, il est frappant de noter que l'importance des théories, largement discutée lors du débat, n'est explicitée que dans sept cartes sur treize (soit 54 %). Nous pouvons penser qu'il s'agirait peut-être de l'effet du choix d'articles relativement récents et tous établis dans le cadre d'une biologie moderne résolument ancrée dans une approche évolutionniste. Le résultat aurait pu être différent si le système classificatoire linnéen, non évolutionniste, avait été introduit dans l'analyse.

La mise en jeu de valeurs et d'éléments idéologiques dans l'activité scientifique fut largement discutée pendant le débat. L'ancrage disciplinaire - en l'occurrence écologique pour Whittaker - a été perçu comme le signe d'une subjectivité du chercheur, Whittaker étant taxé d'« écolo-centré ». La lecture de l'article de T. Cavalier-Smith donna aux étudiants l'impression d'un personnage ambitieux ayant « l'envie de s'illustrer » (1178) et la « volonté d'être révolutionnaire » (1174). Les étudiants sont donc très sensibles à la dimension humaine de la science. Ce résultat semble laisser présager de la faisabilité d'enseignements visant à faire travailler la dimension sociale de la science à partir d'articles scientifiques, tout en appelant à une certaine vigilance dans le choix des articles pour éviter la construction d'une image caricaturale des positions tenues par les chercheurs. Par ailleurs, la pensée gradiste a été aisément repérée dans les articles de R.H. Whittaker et T. Cavalier-Smith, que ce soit par la forme orientée de l'arbre ou par le vocabulaire avec l'usage de termes comme « supérieur » pour qualifier certains groupes biologiques et projeter un jugement de valeurs. Sept cartes conceptuelles sur treize (54 %) abordent la question des valeurs et de l'idéologie dans l'évolution des idées à propos du groupe des végétaux.

Le tableau 79 récapitule les principaux résultats concernant les questions de recherche du pôle 1, relatif aux recherches de significations.

QR1 Recherche de significations : étude des raisonnements et de l'image de la nature de la science des étudiants
QR1a. Comment les étudiants différencient-ils les principes spécifiques des différentes classifications (fonctionnelle de type écologique et phylogénétique), que l'on peut distinguer notamment par l'usage de l'homologie ainsi que les conséquences d'une perte de fonction ? Quelles difficultés rencontrent les étudiants et quels obstacles sont mobilisés ?
*** Usage de l'homologie** • Il n'est pas du tout évident pour les étudiants que l'utilisation de caractères homologues ne fait pas partie du cahier des charges d'une classification fonctionnelle (ici de type écologique) => confusion entre les principes des classifications phylogénétiques et fonctionnelle • Cependant les étudiants n'ont pas de difficulté à identifier l'importance du recours à l'homologie dans un contexte clairement évolutif ou phylogénétique. *** L'absence de photosynthèse chez certains végétaux** Phénomène émergent non anticipé car apparu relativement à l'article de T. Cavalier-Smith en décalage avec ce qu'il écrit. « Comme tous ne le font pas c'est pas un caractère [parlant de la photosynthèse] qui pourra / qui pourra les regrouper dans un groupe monophylétique » (466). Un caractère acquis ancestralement peut évoluer, voire disparaître dans l'une des lignées d'un groupe monophylétique. Problème de l'intégration du temps en phylogénie : perte secondaire. Révèle une incompréhension majeure, qui était apparue déjà sur le questionnaire dans un autre contexte (cas de l'orobanche) => hypothèse de la mise en jeu d'une pensée typologique.
QR1b. Dans quelle mesure les étudiants établissent la relation entre la pluralité des conceptions des végétaux et les différentes classifications de la carte conceptuelle ?
Toutes les cartes conceptuelles intègrent une pluralité de conceptions des végétaux, à l'exception de la carte B3 (cas particulier). 5 cartes sur 13 (soit 38%) établissent clairement cette relation dans leur carte et attestent d'une prise de distance importante par rapport à la dépendance entre classifications et conceptions des végétaux. Si la conception phylogénétique est présente dans toutes les cartes (exceptée la B3), la conception fonctionnelle / écologique est présente quant à elle dans 9 cartes sur 13 (soit 69 %). Quatre groupes ont indiqué l'existence d'une conception mixte à dominante écologique, comme celle résultant de la classification de Whittaker (cf. carte B2). Trois autres conceptions apparaissent également dans les cartes bien que n'ayant pas été travaillées dans la séquence. La plus fréquente des trois est la conception cellulaire et fonctionnelle, présente dans 69 % des cartes et qui dominait largement dans les réponses au questionnaire de départ. La seconde est la conception morpho-anatomique définissant les végétaux par leur organisation (comme la présence d'une tige feuillée, le cormus ou d'un thalle).

Elle a une certaine proximité avec la conception fonctionnelle macrocentrée (CFM) que nous avions dégagée dans le questionnaire initial. Il apparaît enfin une conception utilitaire de nature anthropocentrée, bien que moins représentée avec 23 % des cartes. Elle n'était pas apparue dans l'étude précédente.

La carte B8 est intéressante car elle est présente un paradoxe. En effet, le premier concept lié aux végétaux est la photosynthèse, associé de manière « absolue » à ce groupe biologique défini de manière uniquement fonctionnelle dans un premier temps. Pourtant le reste de la carte indique très clairement l'existence d'une multiplicité de conceptions en étroite relation avec les systèmes classificatoires.

On retrouve la même difficulté pour la carte A7 étudiée.

La photosynthèse est envisagée comme un critère absolu de définition des végétaux dans une approche typologique

QR1c. Quelles raisons identifient les étudiants pour expliquer la rectification du groupe des végétaux entre les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes? Comment expliquent-ils la disparition ou la délimitation du groupe des végétaux dans les arbres phylogénétiques actuels ?

• Problème de définition d'un groupe dans une classification phylogénétique

Le débat portant sur l'article de F. Burki (classification phylogénomique des Eucaryotes, 2014) s'est révélé particulièrement intéressant. Épisode fortement argumentatif avec opposition de plusieurs thèses sur l'existence ou non des végétaux avec affrontement d'une approche essentialiste et d'une approche nominaliste. Épisode de problématisation autour de la définition d'un groupe dans une classification phylogénétique

• Méthodes de classification

Centration importante des étudiants sur la phénétique (827-854) pour l'analyse des données moléculaires. Nous pouvons penser qu'il s'agit, au moins en partie, de l'effet de l'enseignement dans lequel la cladistique prend très souvent pour exemple des caractères morpho-anatomiques, alors que la méthode UPGMA est enseignée en licence pour la phénétique.

Déficit dans la compréhension des raisons, des fondements de la méthode cladistique. Difficultés importantes concernant l'importance de la polarisation des caractères.

• Importance des techniques et des théories

Double frise chronologique très utile. Les étudiants s'appuient beaucoup sur elle. Mais ils mobilisent parfois uniquement le principe d'antériorité. Ils ne comprennent pas bien le concept de « condition de possibilité » [Cavalier-Smith associé à cladistique (antérieure) alors que non utilisée => peut conjuguer un usage de la frise basée sur l'antériorité chronologique mais aussi un problème de compréhension de la cladistique.]

Les étudiants perçoivent facilement la relation entre l'évolution des idées et l'évolution des techniques (dans le débat comme dans les cartes). Techniques citées à 100% alors que théories à 54%

QR1d. Existent-ils des écarts entre la problématisation de référence développée par les auteurs et celle qui est construite par les étudiants à propos de ces mêmes articles ? Si oui comment peut-on les interpréter : nature des difficultés, obstacles ?
Décalage entre les problématisations construites par les étudiants et par T. Cavalier-Smith Les étudiants construisent la nécessité théorique de la non-monophylie des végétaux au regard de la contrainte empirique de l'absence de photosynthèse chez certains organismes appartenant au groupe des végétaux. Si les étudiants n'intègrent pas la temporalité et la question des pertes secondaires dans leur raisonnement (dans cette situation bien spécifique), Cavalier-Smith intègre évidemment cette préoccupation puisque son objectif est de reconstituer les liens de parenté et l'histoire évolutive. Le décalage entre les problématisations construites par les étudiants et par T. Cavalier-Smith est expliqué par la mise en relation de contraintes différentes avec la même nécessité de remettre en cause le règne Plantae au sens de Whittaker. La différence des contraintes mobilisées peut s'expliquer par une différence concernant le registre explicatif. Là où T. Cavalier-Smith mobilise strictement un registre phylogénétique (bien que non cladistique), les étudiants utilisent un registre explicatif qui mêle des principes phylogénétiques (comme ne créer que des groupes monophylétiques) et des principes relevant d'une classification fonctionnelle (comme regrouper des espèces partageant toutes une même fonction).
QR1e. L'étude de la littérature scientifique primaire donne accès à certaines facettes de l'activité scientifique. Quelle image de la nature de la science mobilisent les étudiants lors de l'analyse des articles scientifiques ?
De nombreux items liés à la NoS sont travaillés dans la reconstruction didactique. Une formation basée sur une analyse d'articles scientifiques paraît favorable à un travail centré sur l'image de la nature de la science Focus mis sur la dimension épistémologique (internaliste) de la NoS et peu la dimension sociologique (externaliste) Lien au problème travaillé, dépendance aux techniques et théories, dimension provisoire des savoirs scientifiques • Perception des controverses facilitée (par le choix des articles et l'item de la grille d'analyse) • Place des valeurs / idéologies : un item dans la seconde grille d'analyse Subjectivité du chercheur, fruit d'un parti-pris lié à sa discipline : Whittaker : « écolo-centré » Cavalier-Smith : « volonté d'être révolutionnaire » (1174), « l'envie de s'illustrer » (1178). La science perçue comme une activité humaine Pensée gradiste perçue chez R.H. Whittaker et T. Cavalier-Smith : forme de l'arbre et vocabulaire connoté (comme « supérieur ») Sept cartes conceptuelles sur treize (54%) abordent la question des valeurs et de l'idéologie dans l'évolution des idées

Tableau 79 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 1

6.2. Conclusion sur les choix didactiques de la séquence

Bien que la recherche de significations fut première dans notre travail, nous avons souhaité la combiner avec une recherche de faisabilités pour questionner *a posteriori* la pertinence des choix réalisés de manière à identifier des possibles didactiques. Nous présenterons tout d'abord les choix qui nous ont semblé féconds, puis les évolutions proposées.

6.2.1. Des choix qui se sont révélés féconds

- **Travail sur articles scientifiques en anglais**

Le choix de faire lire des articles scientifiques en anglais et non adaptés était un des paris sur lequel reposait toute l'expérimentation didactique. L'engagement dans la lecture et l'analyse des articles, puis dans le débat, indique que ce choix didactique a été réaliste pour des étudiants de master 1 préparant le concours de recrutement des professeurs de SVT. Néanmoins, il faut souligner la lourdeur de ce type de dispositif pédagogique chronophage. En effet, le travail de lecture des articles a été accompagné par une séance spécifique en anglais. Ensuite, une demi-journée a été balisée dans l'emploi du temps de façon à permettre le travail par binôme sur les deux articles avec la grille d'analyse.
Aucune difficulté liée à l'anglais ne fut exprimée par les étudiants lors du débat. La citation de quelques extraits d'articles en anglais a été notée lors du débat pour soutenir l'argumentation, ce qui atteste d'une certaine appropriation des textes. À ce niveau d'étude universitaire, le choix de proposer des articles non traduits reste donc possible.

- **Préparation du débat collectif par une première phase en petit groupe**

Chaque étudiant n'ayant pas lu l'ensemble des articles, une première phase a permis de préparer le débat collectif. Chaque petit groupe associait des étudiants ayant lu les différents articles et devait remplir une grille d'analyse comparée pour les quatre textes. La situation didactique a permis aux étudiants d'intervenir sur les articles non lus. Certains sont intervenus autant pour les articles lus et non lus alors que d'autres étudiants interviendront davantage sur les articles lus. Nous avons remarqué que le premier facteur influençant la prise de parole tenait à la personnalité des étudiants puisque le nombre d'interventions a varié de 0 pour une étudiante à 120 pour Thomas, avec une moyenne de 34. Si le nombre de prises de paroles ne représente qu'un indicateur très partiel de l'efficacité du travail préparatoire, il fut intéressant de constater que des étudiants, n'ayant pas lu un article, proposèrent des arguments nouveaux faisant ainsi avancer le débat. Aussi, ces interventions qualitativement importantes sur des

articles non lus constituent un élément positif d'évaluation du choix didactique proposé avec une séance en deux phases.

L'analyse du débat concernant la nature du groupe des végétaux pour F. Burki a révélé qu'il fut particulièrement fructueux que deux étudiants aient lu le même article au sein du petit groupe de travail. Thomas et Aude étaient en désaccord, ce qui a donné lieu à un épisode fortement argumentatif très riche (cf. figure 81). Le fait d'avoir constitué trois groupes de cinq étudiants avec quatre articles à discuter n'a pas permis de faire naître ces débats au sein des petits groupes pour l'ensemble des articles. Le fait de disposer d'une seule interprétation pour un article est moins riche. Peut-être que deux groupes de sept à huit étudiants auraient été de ce point de vue plus pertinent, bien que l'implication de chacun soit toujours plus aisée dans un petit collectif.

- **Grilles d'analyse des articles**

La première grille d'analyse des deux articles avait pour rôle d'orienter leur lecture initiale en binôme. Elle comprenait une colonne où devait être consignée des citations de l'article permettant de justifier l'analyse réalisée. Ce choix visait à stimuler une lecture attentive des articles afin de soutenir l'argumentation lors du débat par des justifications précises. Des étudiants s'appuyèrent sur ces citations pour retourner à l'article lors de la première phase de la séance en petit groupe, ce qui valide le choix de faire consigner les citations dans la première grille d'analyse. Nous pouvons nous questionner sur la pertinence du choix de certains items des grilles d'analyse. En effet, deux items portaient sur la place d'organismes unicellulaires, l'euglène et la diatomée, par rapport au groupe des végétaux dans chaque classification. Rappelons que ce choix avait été réalisé suite aux difficultés constatées pour ces espèces dans le questionnaire initial. Nous avons été initialement très surpris de constater que ces deux espèces n'apparaissent presque pas dans les cartes : une seule sur 13 (la carte B2). Une interprétation possible réside dans le fait que la carte conceptuelle a une dimension généralisante qui décontextualise l'analyse des exemples « locaux » comme ceux des deux espèces discutées. Ainsi ces items ont permis d'exemplifier les changements de contour du groupe des végétaux dans les différents systèmes en attirant le regard des étudiants sur des cas précis.

La grille permet de diriger l'analyse des articles ainsi que d'orienter le débat scientifique. Toutefois, elle ne suffit pas à elle seule vu l'importance de certaines difficultés (comme, par exemple, l'usage de l'homologie). Nous reviendrons prochainement sur le rôle de l'enseignant.

- **Frise chronologique**

La double frise chronologique fut très utile durant la phase consacrée à la discussion des conditions de possibilité techniques et théoriques de chaque classification. Les étudiants se sont beaucoup appuyés sur ce document alors que le temps restant dans la séance devenait limité. Il semble cependant légitime de se demander si ce document n'a pas trop fermé la réflexion des étudiants aux seuls éléments de la frise. Ils mobilisèrent à plusieurs reprises le principe d'antériorité. Par exemple, le microscope électronique a été considéré par les étudiants comme une condition de possibilité de la classification de R. H. Whittaker parce qu'il lui était antérieur, bien que non nécessaire pour définir ses cinq règnes du vivant. De même, T. Cavalier-Smith a été associé à tort à la cladistique, antérieure à son article. Il apparaît donc que si la frise a orienté la réflexion sur certains points jugés essentiels, son usage n'est pas pour autant aisé car il suppose de ne pas penser qu'en terme d'antériorité chronologique mais de redéfinir chaque système classificatoire par rapport à ses fondements théoriques et techniques.

6.2.2. Modifications proposées

L'analyse de la reconstruction didactique permet de dégager des pistes d'évolution de la séquence.

- **Nécessité de phases d'institutionnalisation**

Notre premier objectif de recherche résidant dans la recherche de significations plus que sur la recherche de possibilités, cela a pesé fortement sur l'expérimentation. En effet, cela a une conséquence sur la posture de l'enseignant avec qui il a été convenu d'intervenir le moins possible afin de laisser le plus de place possible aux étudiants pour étudier leur argumentation et ses fondements. L'analyse révèle la mise en jeu de difficultés importantes n'ayant pas pu se régler sans apport de l'enseignant. Cela a été le cas pour l'usage de l'homologie et la nécessité de polariser les états de caractères dans une approche cladistique. Il apparaît donc que des phases d'institutionnalisation soient nécessaires à l'issue des épisodes pour lesquelles la controverse n'a pas pu être tranchée uniquement sur la base des arguments avancés par les étudiants. Il s'agit notamment de la controverse sur l'existence ou non des végétaux pour Burki au cours de laquelle se sont opposées trois thèses : deux mobilisant une approche nominaliste, la troisième une approche essentialiste. Il s'agit également du décalage produit entre la problématisation développée par Cavalier-Smith et celle des étudiants concernant la

non-monophylie des végétaux (au sens de Whittaker). À plusieurs reprises, l'enseignant a questionné sur l'existence d'une synapomorphie chez tous les descendants d'un ancêtre commun. Les étudiants n'ont pas su résoudre par eux-mêmes ce problème. Une phase d'institutionnalisation aurait été nécessaire dans une optique d'apprentissage.

- **Choix des articles scientifiques**

La nature des articles constitue une variable didactique essentielle. Le choix des deux extraits d'articles d'écologie est clairement à repenser. Si les trois auteurs des articles consacrés à la systématique des Eucaryotes sont très fortement cités dans les cartes, les deux auteurs Gasparini et Sabine ne seront cités que par deux cartes sur treize (soit 15 %). Cette différence est particulièrement frappante. Durant le débat, une différence majeure fut exprimée par les étudiants entre un article paru dans un journal scientifique ou dans une encyclopédie comme celui de Gasparini, article qui a été déconsidéré car ne présentant qu'une « définition » comme le ferait un dictionnaire. De plus, l'article de Gasparini a été mis de côté car il ne concerne pas tous les végétaux mais seulement le phytoplancton. Le problème lié à ce choix d'article écologique n'est probablement pas sans lien avec l'écart de présence des conceptions phylogénétique et fonctionnelle / écologique dans les cartes conceptuelles. Si la conception phylogénétique est présente dans toutes les cartes conceptuelles (exceptée la carte B3, très particulière), la conception fonctionnelle est présente dans 9 cartes sur 13 (soit 69 %).
Nous suggérons de faire évoluer la séquence en ne proposant qu'un seul article scientifique en écologie équivalent dans son format aux articles systématiques. Notre choix se porterait sur un article étudiant le cycle biogéochimique du carbone dans lesquels les cyanobactéries seraient clairement indiquées comme appartenant explicitement au groupe fonctionnel des végétaux, définis comme l'ensemble des producteurs primaires fixant le CO_2 par photosynthèse oxygénique.

- **Documents d'accompagnement des articles**

La lecture des articles n'aura pas suffi à comprendre les positionnements théoriques de T. Cavalier-Smith et de F. Burki. Nous proposons donc d'ajouter des documents complémentaires afin d'accompagner l'analyse des articles. Il s'agit de situer comment se positionne la systématique évolutionniste par rapport à la cladistique, ce qui aiderait les étudiants à percevoir l'usage de l'homologie, non polarisée, que réalise T. Cavalier-Smith acceptant les groupes paraphylétiques dans sa classification.

Concernant la méthode phylogénomique mise en œuvre par Burki, il pourrait être utile de proposer un petit document complémentaire explicitant les fondements méthodologiques. L'objectif est de proposer une aide aux étudiants dans l'établissement d'une relation avec la méthode cladistique.

- **Nombre de grilles à remplir**

Trois grilles d'analyse furent remplies par les étudiants : une première grille par binôme pour la lecture des deux articles, une seconde à remplir pour comparer les quatre articles à l'issue du travail en petit groupe, et enfin une troisième pour dresser la synthèse sur les trois articles de systématique des Eucaryotes. Si ces différentes productions ont été exigées pour notre travail de recherche, nous avons perçu une certaine lassitude lorsque la troisième grille a été distribuée, laissant apparaître une impression de répétition quant à la forme d'enseignement mise en œuvre. Dans une perspective pédagogique, plus que didactique, il nous semble que deux utilisations successives de grille et non trois serait vraisemblablement à privilégier pour ne pas démobiliser les étudiants.

- **Le travail mobilisant les cartes conceptuelles**

En raison de la complexité conceptuelle de la tâche, du temps limité et de la découverte des fonctionnalités techniques du logiciel, nous suggérons la réalisation de la carte conceptuelle sur deux séances distinctes. La conséquence évidente de cette proposition est d'allonger la durée de la séquence d'enseignement. Mais la seconde séance pourrait démarrer par une présentation des différentes productions réalisées. Un débat scientifique permettrait d'argumenter les raisons des choix réalisés puis de modifier la carte en prenant en compte les raisons travaillées lors du débat. Afin de permettre la construction de savoirs problématisés, la consigne de réalisation de la carte conceptuelle devrait appeler explicitement à dégager les raisons de chaque branche conceptuelle par la mise en relation de faits et d'idées. Le pilotage du débat par l'enseignant devrait tendre à l'établissement de la dimension apodictique des nécessités construites.

Le tableau 80 récapitule les principaux résultats concernant les questions de recherche du pôle 2, relatifs aux recherches de faisabilité et à la détermination de possibles didactiques.

QR2 Recherche de faisabilités : évaluation des choix didactiques et détermination de possibles didactiques
QR2a. Engagement sur les articles non lus : la présentation croisée des articles associée à débat interne à chaque petit groupe mixte permet-il aux étudiants de s'engager dans le débat collectif sur les articles non lus ?
Un premier résultat réside dans l'importante différence du nombre de prises de parole par étudiant. (moyenne = 34, max = 120, min = 0 et n < 10 pour 5 étudiants sur 15). Ainsi au delà de la lecture ou non des articles, le premier facteur d'engagement dans le débat collectif semble donc d'abord lié à la personnalité des étudiants. La situation didactique proposée permet aux étudiants d'intervenir sur les articles non lus, mais dans des proportions qui sont semblables ou non de celles des articles lus selon les étudiants (7 étudiants : différence significative entre articles lus et non lus ; 5 pas de différence significative et 3 : calcul non réalisable (trop peu d'interventions <10). Cette étude basée sur le nombre de prises de parole au cours du débat présente d'importantes limites et n'est qu'un indicateur partiel. En effet, le nombre d'interventions ne préjuge pas de la qualité de l'argumentation développée. De plus, certains étudiants participent peu au débat collectif, mais sont très attentifs et participent intellectuellement à la séance de manière active. De manière plus qualitative, il est notable qu'au cours du débat collectif des étudiants argumentent de manière active en proposant des arguments nouveaux et nuancent leur propos par une modalisation appréciative en indiquant qu'ils n'ont pas lu l'article. Ces deux exemples concernent deux étudiants, Aude et Thomas, pour lesquels la différence du nombre d'interventions était significative entre articles lus et non lus. Pour autant, il apparaît que leurs interventions sur les articles non lus sont qualitativement importantes, ce qui constitue un élément positif d'évaluation de la situation didactique proposé.
QR2b. Quelle est la pertinence du choix des articles proposés aux étudiants articles dans le but de travailler la dualité fonctionnelle et évolutive des classifications et l'évolution des idées relative au groupe des végétaux ? Des documents d'accompagnement des articles apparaissent-ils comme nécessaire dans le contexte de la situation analysée ?
• Choix des articles scientifiques : variable didactique essentielle Les trois auteurs des articles consacrés à la systématique des Eucaryotes sont très fortement cités dans les cmap. Par contre, les deux auteurs des deux extraits d'articles d'écologie (Gasparini ; Sabine) ne sont cités que par deux cartes sur treize. Différence perçue entre un article paru dans un journal scientifique ou dans une encyclopédie comme celui de Gasparini (« juste une définition »). Problème de l'article de Gasparini mis de côté car il ne concerne pas tous les végétaux mais seulement les végétaux planctoniques. Nous suggérons donc de faire évoluer la séquence en ne proposant qu'un seul article écologique de nature scientifique, équivalent dans son format aux articles systématiques, et dans lequel le processus de catégorisation ne soit pas ambigu. Retenir un article sur le cycle

biogéochimique du carbone (dans lesquels les cyanobactéries appartiennent explicitement au groupe des végétaux fixant le CO_2 par photosynthèse). **• Difficultés des étudiants à identifier les méthodes utilisées par T. Cavalier-Smith et F. Burki** Nécessité de doc d'accompagnement sur le positionnement de la Nouvelle Systématique par rapport à la cladistique et sur le positionnement des approches phylogénomiques par rapport à la cladistique
QR2c. Quelle est la faisabilité d'un travail sur des sources primaires en anglais avec l'accompagnement proposé ?
Au cours de la séance, aucune difficulté liée à l'anglais n'a été exprimée par les étudiants. Lors de débat sur les articles, l'anglais n'a jamais été pointé comme posant problème et l'analyse des échanges ne révèle pas d'incompréhension de l'anglais susceptible d'entraver la réflexion et le débat. À quelques moments, les étudiants ont soutenu leur argumentation en citant en anglais des extraits d'articles, ce qui atteste d'une appropriation Aucun changement ne semble à apporter à la séquence du point de vue de la langue anglaise

Tableau 80 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 2

6.3. Conclusion sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche

L'utilisation des cartes conceptuelles dans notre recherche permet d'envisager plusieurs objectifs :

- étudier les modes de raisonnement et les difficultés conceptuelles des étudiants
- étudier si le dispositif didactique expérimenté permet d'étudier la problématisation.

Nous souhaitons dans cette section dresser un bilan d'ordre méthodologique des modalités d'analyse des cartes conceptuelles et de leurs apports. L'analyse de l'ensemble des cartes conceptuelles (cf. figure 97) fut permise par l'élaboration d'un script informatique avec R.

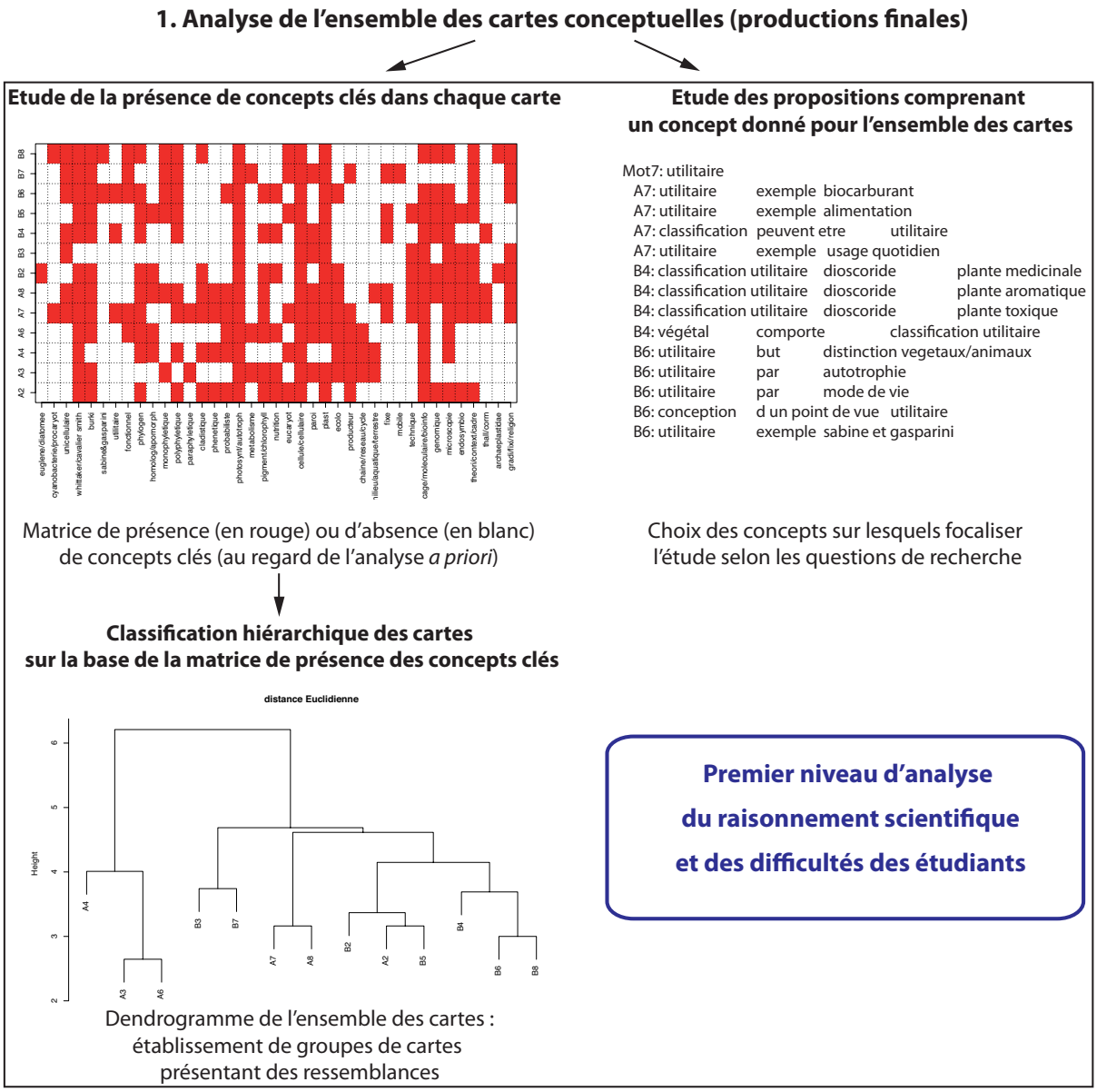


Figure 97 : modalités d'analyse de l'ensemble des cartes conceptuelles

L'élaboration d'une matrice de présence de concepts jugés clés au regard des questions de recherches visées donne une vision d'ensemble des cartes conceptuelles élaborées par le groupe d'élèves. Elle procure une description synthétique des concepts utilisés dans les cartes et permet une première étude quantitative d'occurrence. La réalisation d'une classification hiérarchique permet d'identifier des « clusters » de cartes ressemblantes. Leur pertinence reste étroitement dépendante du choix des concepts retenus dans la matrice, résultant de l'analyse *a priori* de la tâche. Cet outil apporte un éclairage permettant la comparaison des cartes et la sélection de celles qui méritent le plus d'être étudiées finement au niveau du processus d'élaboration. Outre cette liste de concepts, l'élément principal à étudier dans les cartes réside dans la nature des relations conceptuelles. Le script élaboré permet d'obtenir l'ensemble des

propositions contenant un concept donné et ainsi de focaliser l'étude de signification sur ces seules relations conceptuelles. Rappelons qu'un travail préparatoire des cartes est nécessaire pour traiter la synonymie. Cette méthode autorise l'analyse d'un nombre important de cartes conceptuelles et ouvre la porte à des recherches portant sur des effectifs importants. Mais comme nous l'avons montré, se limiter à l'analyse des productions finales procure des informations réduites et un risque de surinterprétation plus grand (cf. figure 98).

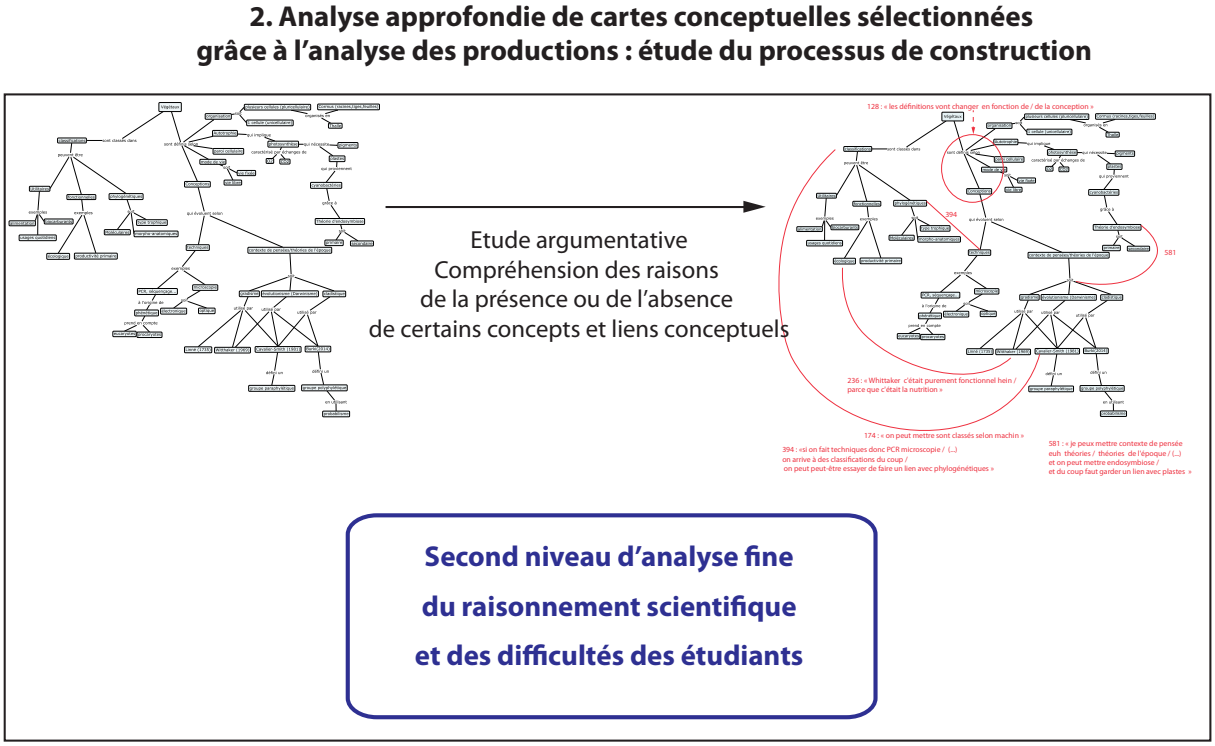


Figure 98 : modalités d'analyse approfondie de la construction de cartes conceptuelles sélectionnées

L'analyse fine de l'argumentation permet de comprendre les raisons de la présence ou de l'absence de certains concepts et liens conceptuels. Elle facilite le contrôle des inférences réalisées pour interpréter l'activité des étudiants en terme de système explicatif.

Concernant l'analyse de la construction de la carte, cette étude de cas n'a cependant pas permis de montrer que le dispositif didactique mis en œuvre permet à lui seul d'accéder à la problématisation développée par les étudiants. Nous proposons donc de le faire évoluer en faisant suivre la construction de la carte par un débat portant sur la comparaison des différentes cartes conceptuelles réalisées, ouvrant ainsi une nouvelle perspective de recherche.

Le tableau 81 récapitule les principaux résultats concernant les questions de recherche du pôle 3, relatif à l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche.

QR3 Recherche méthodologique : le concept-mapping comme outil d'analyse de du raisonnement et de la problématisation
• Concept-mapping et étude du raisonnement des étudiants QR3a. La carte réalisée (autrement dit la production finale) reflète-t-elle « fidèlement » le raisonnement mis en œuvre par les étudiants lors de sa construction ? S'il existe des écarts entre la production finale et l'argumentation développée pendant la construction, comment les interpréter ? Autrement dit, quelles sont les potentialités de cet outil de recherche mais également quelles sont les limites de l'étude de cartes sans analyser leur construction ?
• Concept-mapping et étude du raisonnement des étudiants L'étude de la construction de la carte apparaît comme une précieuse source d'informations complétant celles fournies par la production finale et limitant les interprétations abusives sur le raisonnement des étudiants. Elle ne remet pas à cause la pertinence de l'étude des cartes conceptuelles mais fournit de nombreux éléments qui permettent de mieux comprendre la production réalisée dans son contexte et ainsi de contrôler davantage le nécessaire travail d'inférence du chercheur. L'absence de certains concepts et de certains connecteurs a plusieurs explications. Elle peut être le fruit d'un choix délibéré, le concept ou le lien étant jugé en dehors du problème travaillé. Mais elle peut également indiquer une difficulté conceptuelle comme par exemple la difficulté à clarifier précisément la nature de certains liens conceptuels. Enfin, l'absence peut également être liée à des raisons pratiques, notamment le manque de temps empêchant de revenir sur certains choix qui n'ont pas été finalisés ou les contraintes liées à la nature de la tâche dont celle de produire une carte lisible. L'enrichissement de la la carte avec les différents liens conceptuels discutés par les étudiantes, atteste que la seule prise en compte de la production finale serait réductrice. Enfin, l'analyse de la construction de la carte apporte des informations sur la confiance accordée à certaines branches grâce à différents modalisateurs comme « bah c'est pas mal » (729) ou à l'inverse « ah je sais plus / si c'est ça » (715).
• Concept-mapping et étude de la problématisation QR3b. Dans quelles mesures les cartes conceptuelles peuvent-elles être utilisées pour analyser la construction de problèmes par les étudiants ? L'étude de l'activité de construction de la carte permet-elle de caractériser le double dédoublement caractérisant le processus de problématisation (entre faits et idées d'une part et entre assertorique et apodictique d'autre part) ?
• Concept-mapping et étude de la problématisation Étude d'un exemple, celui de la branche « plastes / qui proviennent de / cyanobactéries / grâce à / théorie d'endosymbiose / soit primaire / soit / secondaire ». L'analyse argumentative indique que le modèle explicatif (théorie de l'endosymbiose) est avancé mais sans mobiliser explicitement des

données empiriques (comme la présence de membranes plastidiales multiples ou la présence de matériel génétique de type bactérien). Ainsi sans dédoublement explicite entre faits et idées, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que le problème de l'origine des plastes soit construit lors de cette activité. Dans ce cas, nous ne pouvons pas dire si le savoir mobilisé par les étudiants est de nature propositionnelle ou bien problématisée. Dans d'autres branches, il y a mise en relation de concepts des deux registres (cas de la photosynthèse). Il reste à examiner s'il y a construction de nécessités. La présence de pigments et de plastes est qualifiée par les étudiantes de *nécessaire* pour assurer la photosynthèse (569-571). Cette mise en relation est-elle suffisante pour affirmer que le savoir représenté dans la carte est de nature apodictique ? Il est difficile de l'affirmer avec certitude car les raisons de la nécessité de pigments ne sont pas indiquées (nécessité de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique).

Cette étude de cas montre que le dispositif didactique mis en œuvre ne permet pas à lui seul d'accéder à la problématisation développée par les étudiants. Nous proposons donc de le faire évoluer en faisant suivre la construction de la carte par un débat portant sur la comparaison des différentes cmap réalisées. La discussion autour de plusieurs cartes nous semble de nature à engager les étudiants « dans un processus rationnel correspondant à une exploration du possible, de l'impossible et du nécessaire » (Orange, 2005, p. 8). Un tel dispositif didactique se rapproche alors des méthodologies développées au sein de la communauté scientifique étudiant la problématisation, faisant une place centrale au débat scientifique. Mais il s'en distingue par la centration du débat sur l'objet cmap dont la spécificité est de présenter des mises en relations conceptuelles permettant d'aller vers un degré plus élevé de structuration des savoirs et de généralisation. Mais une condition de possibilité de la construction de savoirs problématisés par l'utilisation de cartes conceptuelles consiste en une exigence forte quant à la mise en relation entre faits et idées. Cette attention particulière pourrait se traduire à la fois dans la consigne de réalisation de la carte conceptuelle appelant explicitement à dégager les raisons de chaque branche en articulant des éléments empiriques et théoriques, mais aussi dans le pilotage du débat par l'enseignant.

Tableau 81 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 3

Chapitre 5 : discussion générale

1. DISCUSSION THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE 444

1.1. Les relations entre didactique et histoire des sciences 444
1.1.1. Nature de la dialectique entre la sphère didactique et la sphère historique 444
1.1.2. Quel degré d'accompagnement des textes ? 446
1.1.3. Genres de littérature scientifique et proximité historique 447
1.1.4. Travail sur des articles scientifiques et image de la nature de la science (NoS) 448
1.1.5. Penser une didactique de l'histoire des sciences 449

1.2. La problématisation dans notre reconstruction didactique 450
1.2.1. Les items de la grille d'analyse pensés comme des inducteurs de problématisation 450
1.2.2. La réalisation de la carte conceptuelle : une tâche impliquant plusieurs problématisations à la fois et l'articulation entre différents registres explicatifs 451

1.3. Les méthodologies qualitatives et quantitatives en didactique 452

2. DISCUSSION SUR LE RAISONNEMENT DES ÉTUDIANTS CONCERNANT LE GROUPE DES VÉGÉTAUX ET LES CLASSIFICATIONS BIOLOGIQUES 455

2.1. De l'enquête didactique sur les conceptions à la reconstruction didactique 455
2.1.1. Les conceptions des végétaux : comparaison de l'étude par questionnaire avec les cartes conceptuelles 455
2.1.2. Le raisonnement classificatoire 459
2.1.3. Définir et classer 461

2.2. Bilan sur les principaux modes de raisonnement pouvant faire obstacle 463

3. IMPLICATIONS POUR L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION 468

3.1. Une plus large portée des résultats de cette recherche à d'autres groupes biologiques 468

3.2. Implications didactiques de cette recherche 469
3.2.1. Définir et classer : un enjeu de formation 469
3.2.2. Une vigilance à l'ambiguïté 470
3.2.3. Articuler les différentes conceptions des végétaux et identifier leur domaine de validité et leur contexte d'utilisation 470
3.2.4. Implications pour l'enseignement universitaire et la formation des enseignants 471
3.2.5. Implications pour l'enseignement secondaire 472

Notre recherche doctorale s'organise autour de trois enquêtes complémentaires qui furent présentées successivement au cours des chapitres 2, 3 et 4. Ce dernier chapitre entend répondre à la problématique générale de la thèse, par la mise en relief des résultats majeurs. Les limites de la recherche seront également discutées.

Ce chapitre est structuré en trois temps.

Il débutera par une discussion de nature théorique et méthodologique, afin de caractériser la dialectique entre les enquêtes didactique et historique mise en œuvre dans notre recherche ; elle se poursuivra par une réflexion sur les spécificités de la problématisation travaillée dans le cadre de l'expérimentation didactique ; enfin, elle dressera le bilan des différentes méthodologies développées pour cette recherche de manière à comprendre leur complémentarité.

Dans un second temps, la discussion portera sur les résultats concernant le raisonnement des étudiants à propos du groupe des végétaux et des classifications biologiques, ce raisonnement qui, rappelons-le, correspond au premier centre d'intérêt de cette thèse.

Dans un troisième et dernier temps, nous esquisserons des implications de cette recherche qui concerne les enseignements universitaires et secondaires.

1. Discussion théorique et méthodologique

D'un point de vue méthodologique, le cadre de la reconstruction didactique, fondée sur l'histoire des sciences, a déterminé l'organisation de notre recherche. Nous débuterons cette section par une discussion sur les relations entre didactique et histoire des sciences.

1.1. Les relations entre didactique et histoire des sciences

1.1.1. Nature de la dialectique entre la sphère didactique et la sphère historique

La figure 99 représente les relations entre les deux sphères didactique et historique. La dialectique outil - objet (Douady, 1986) permet de comprendre la place de l'histoire des sciences dans notre recherche. En effet, l'histoire est tantôt objet d'étude (chapitre 3), tantôt outil au service des apprentissages des étudiants dans le cadre de la reconstruction didactique (chapitre 4). L'étude historique est orientée par l'enquête didactique (chapitre 2) et notre problématique de recherche.

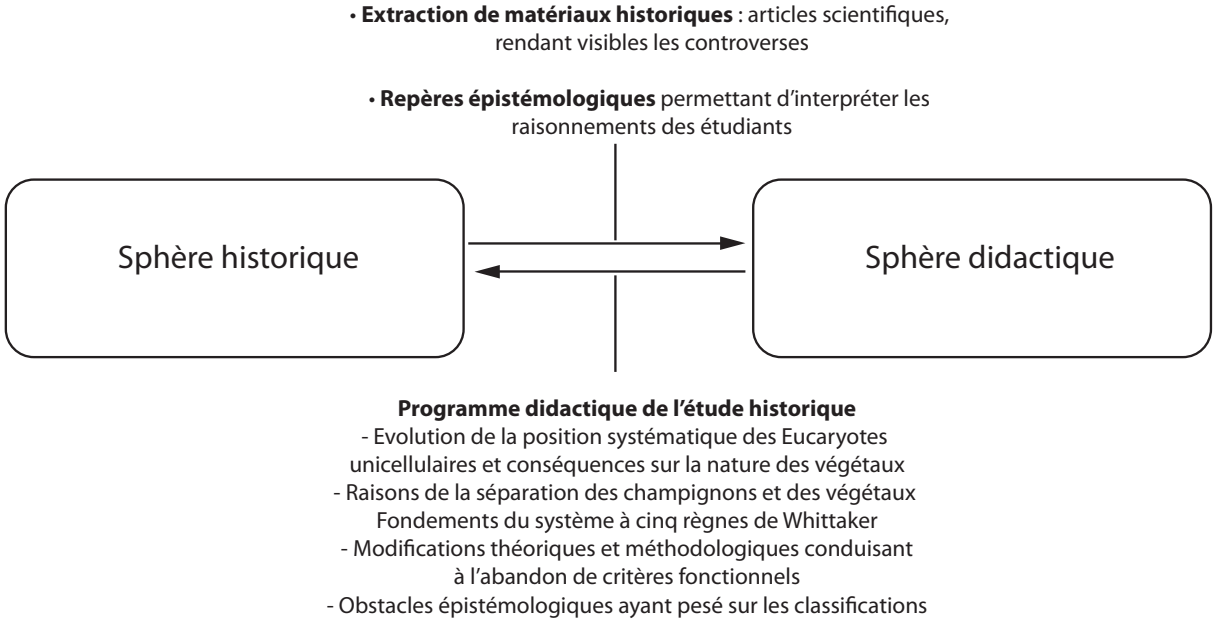


Figure 99 : relation dialectique entre sphère historique et sphère didactique

L'étude historique fut l'occasion d'extraire trois articles correspondant à des systèmes classificatoires suffisamment différents pour permettre de nourrir le travail d'analyse des étudiants durant la reconstruction didactique. Les articles furent choisis de telle sorte que les controverses entre auteurs soient apparentes, ce qui facilite l'identification des raisons des changements classificatoires. L'analyse historique nous a fourni des repères épistémologiques permettant de mieux comprendre les raisonnements conduits par les étudiants au cours du débat. Pour ne citer qu'un seul exemple, l'étude historique du positionnement théorique et de la méthodologie de Tom Cavalier-Smith nous a permis de caractériser l'écart entre la problématisation de l'auteur et celle des étudiants.

Le programme didactique de l'étude historique résulte d'un double jeu de contraintes. Pour partie, ces dernières sont issues de l'analyse didactique des conceptions, réalisée lors de la première phase de la recherche. L'identification des difficultés des étudiants orienta la recherche de leviers historiques par le choix de textes à soumettre aux étudiants. Mais le programme de l'étude historique comprend également les objectifs de la reconstruction didactique, à savoir la polysémie du concept de végétal en liaison avec la diversité des classifications. Pour cela, l'étude historique doit mettre au jour les différentes significations historiques des végétaux et aussi les relier au type de classification, tant sur un plan théorique que méthodologique.

L'analyse de textes historiques nécessite un travail de contextualisation. Nous entendons discuter à présent de l'accompagnement des textes visant à faciliter le repérage du contexte théorique et technique pour chaque auteur étudié.

1.1.2. Quel degré d'accompagnement des textes ?

Dans un travail didactique centré sur l'analyse de textes historiques - dans notre cas des articles scientifiques - une question essentielle concerne l'accompagnement nécessaire permettant aux étudiants de saisir le positionnement des auteurs. Il n'existe pas de réponse générale à cette question : l'accompagnement dépend des connaissances des étudiants et du degré d'implicite dans chaque article.

Il nous a semblé indispensable de fournir aux étudiants des repères chronologiques grâce à une frise. Elle s'est avérée très utile lors du positionnement des différents auteurs par rapport au contexte théorique et technique de chaque époque. Cependant, une difficulté est apparue concernant l'usage de cette frise. Certains étudiants mobilisèrent uniquement un principe d'antériorité pour identifier les conditions de possibilités de chaque classification, alors que ce travail requiert la comparaison des techniques et théories disponibles avec celles utilisées pour élaborer un système classificatoire donné.

Concernant le degré d'implicite dans les textes, l'article de Whittaker ne posa pas de difficultés particulières aux étudiants. Il n'en fut pas de même pour l'article de Cavalier-Smith. En effet, le positionnement de ce biologiste par rapport à la cladistique n'a pas été perçu. Il est resté trop implicite et requiert une expertise importante pour le repérage de la façon dont se positionne théoriquement l'auteur. Il apparaît nécessaire de contextualiser davantage le débat entre la systématique évolutionniste et la cladistique pour permettre la conduite d'une analyse pertinente de cet article.

Cependant, une question se pose concernant les modalités de cet accompagnement. Plusieurs possibilités semblent envisageables :

- débuter par la réflexion relative à la controverse entre la systématique évolutionniste et la cladistique avant d'étudier l'article de Cavalier-Smith pour contextualiser sa lecture ;
- donner des textes d'accompagnement en même temps que l'article afin que les étudiants établissent eux-mêmes la relation entre les textes ;

- - ou, enfin, laisser apparaître les difficultés au cours du débat sur l'article comme nous l'avons fait, puis donner des textes complémentaires afin de lever ces difficultés. Cette réflexion ouvre une nouvelle perspective de recherche.

Dans le contexte de notre recherche à un niveau universitaire élevé (master), l'adaptation des textes ('adapted primary literature') n'a pas semblé nécessaire. Notre recherche n'apporte donc pas d'éléments concernant la question de l'adaptation d'articles scientifiques pour les rendre accessibles à des étudiants de niveau plus faible ou, pour des raisons pratiques, du temps nécessaire à leur exploitation didactique.

Dans la perspective de prolonger cette recherche sur les relations entre didactique et histoire des sciences, il nous paraît important de discuter de deux concepts : celui de genre de littérature scientifique et celui de proximité historique. Ils participent également à la réflexion didactique sur la nécessaire contextualisation historique.

1.1.3. Genres de littérature scientifique et proximité historique

• Les genres de littérature scientifique

Les publications scientifiques sont de nature variée. Il existe plusieurs genres dans ce type de littérature. Notre reconstruction didactique utilise des textes de deux genres différents sans que nous n'anticipions les effets produits par cette différence. Trois des textes sont des articles publiés dans des revues scientifiques. Les deux textes écologiques forment des extraits issus d'encyclopédie : une encyclopédie généraliste pour le premier (E. Universalis) et une encyclopédie spécialisée en biologie pour le second (Encyclopedia of Life Sciences, Wiley). Le statut différent de la source encyclopédique fut pointé par les étudiants et constitua un argument pour ne pas répondre à la question concernant la nature de la classification engagée.

> « enfin Gasparini c'est un article d'encyclopédie (…) dans une encyclopédie on essaie de mettre une définition de la chose alors que les autres c'est des articles scientifiques » (Thomas, 885)

Les trois articles scientifiques étudiés ne correspondent pas une étude expérimentale donnée mais à des propositions d'une classification s'appuyant principalement sur une argumentation théorique. Les arguments empiriques avancés ne sont pas issus d'une étude particulière menée par l'auteur de l'article mais plutôt d'un ensemble de données acquises par différentes recherches. Ce choix se trouve justifié par les objectifs de notre reconstruction didactique. Volontairement, nous avons écarté certains articles dans lesquels une phylogénie est élaborée à partir d'une analyse de données précise, comme par exemple l'article de Burki *et al.* (2007)

étudiant les relations entre 49 espèces grâce à 123 alignements de gènes. Ce type d'article est très intéressant pour comprendre une méthodologie donnée, car elle se présente de façon détaillée. Toutefois, nous avons privilégié des articles dans lesquels la discussion théorique est davantage présente afin de mieux situer les controverses.

Il semble important de cibler le genre d'articles correspondant à l'usage didactique souhaité.

- **La proximité historique**

Les textes historiques travaillés relèvent de l'histoire contemporaine, le plus ancien date de 1969, soit à peine plus de 45 ans. Notre proximité historique avec ces textes est donc grande. D'un point de vue social, l'activité scientifique est donc similaire à celle d'aujourd'hui. Sur le plan des théories biologiques utilisées par les auteurs, la proximité est également forte avec celles dont disposent les étudiants. Il existe, certes, des différences mais beaucoup moins marquées que dans le cas de l'étude de textes historiques très anciens.

La question de l'accompagnement des textes discutée précédemment se pose différemment selon la proximité historique qui sépare les étudiants et les auteurs étudiés. Les difficultés posées par l'étude de textes anciens se manifestent dans le style d'écriture de ces derniers pouvant être la source d'incompréhensions langagières, mais aussi par la compréhension du contexte de l'époque.

Outre la dimension conceptuelle, l'analyse d'articles scientifiques contribue à une réflexion sur la nature de la science dans ses dimensions épistémologiques et sociologiques que nous entendons discuter succinctement en relation, là encore, avec le problème de la contextualisation de cette réflexion.

1.1.4. Travail sur des articles scientifiques et image de la nature de la science (NoS)

L'analyse d'articles scientifiques a permis d'aborder de nombreuses caractéristiques de l'activité scientifique (cf. p. 373), bien que notre objectif premier soit d'ordre conceptuel. Nous ne reviendrons pas, ici, sur les différentes dimensions épistémologiques concernant les caractéristiques des savoirs scientifiques travaillés lors de la reconstruction didactique. Nous tenons à mettre en avant le fait que les étudiants ont été particulièrement sensibles à la dimension humaine et sociale de l'activité scientifique, alors que la grille d'analyse des articles ne les y avait pas poussés. Ils ont mis en avant l'attachement de R. H. Whittaker à des critères écologiques, attachement interprété comme une marque de subjectivité et le fruit d'un parti-pris disciplinaire (qualifié d'écolocentré). T. Cavalier-Smith fut perçu comme un

chercheur mû par des ambitions personnelles, notamment par une volonté de marquer la science par ses travaux.

Ce résultat, non anticipé, soulève la difficulté didactique de la préservation de l'authenticité historique dans sa dimension humaine et sociale et il permet d'identifier un point de vigilance. En effet, le choix des textes peut facilement biaiser la représentation que les étudiants vont se construire, alors qu'ils ne disposent que d'éléments limités par rapport au scientifique étudié. Une réflexion sur la contextualisation de la science dans sa dimension humaine et sociale paraît donc nécessaire si l'on entend éviter la construction d'une image faussée des scientifiques étudiés.

1.1.5. Penser une didactique de l'histoire des sciences

Pour conclure cette discussion, il nous semble important d'ouvrir ici une perspective de recherche : penser une didactique de l'histoire des sciences, une réflexion initiée par des auteurs comme Guedj, Laubé & Savaton (2007). En effet, notre volonté de soumettre aux étudiants des textes primaires non adaptés contraste avec des pratiques de classe faisant un usage anhistorique de textes sortis de leur contexte et qui conduisent à une « pseudo » histoire des sciences (Ibid., p. 7). À lui seul, le recours didactique à des textes historiques ne suffit pas pour mener un enseignement d'histoire des sciences, si tel est l'objectif que se fixe l'enseignant, qu'elle qu'en soient les raisons : conceptuelles, épistémologiques, culturelles, motivationnelles.

Définir la nature historique d'un enseignement scientifique revient à poser la question de la transposition didactique de l'histoire des sciences. Notons que cette question se pose en des termes similaires pour l'enseignement de toute discipline qui interroge les relations existant entre une discipline scolaire et sa discipline universitaire de référence. Par exemple, en quoi l'enseignement de la biologie a de commun avec la biologie que pratiquent les chercheurs ? Guedj *et al.* (2007) en appellent à la définition de « critères clarifiés d'historicité (c'est-à-dire respectant un certain nombre de pratiques sociales en histoire des sciences pour devenir une pratique scolaire de référence) » (p. 11).

La contextualisation historique des textes étudiés constitue un de ces critères. Comme nous l'avons discuté précédemment, la contextualisation correspond à différentes dimensions : théorique, technique, humaine et sociale.

Un autre critère d'historicité pourrait consister en l'adoption d'une posture refusant une approche qui juge des textes et des auteurs du passé à l'aune des connaissances actuelles.

Cette approche de l'histoire des sciences a été critiquée et qualifiée de « whig history » par les anglo-saxons (e.g. Mayr, 1990 et Jardine, 2003). Cette dernière présente de façon triomphaliste l'histoire comme une marche inéluctable vers le progrès scientifique, faisant des scientifiques du passé des gagnants ou 'good guys', des perdants ou 'bad guys' selon leur position au regard des sciences actuelles. Cette approche peut rapidement conduire à des distorsions historiques, comme l'explique J. A. Schuster (1995).

> « it [*whig history*] reads the past to find good guys who supposedly agreed with or promoted ideas the writer values in the present, and it sees the **good guys** being opposed by **bad guys** who, because of ignorance or bias supposedly opposed ideas the writer values in the present. Hence Whig history **distorts the reality of the issues, ideas, goals and viewpoints of people in the past**, refusing to take past people and events in their **own social and cultural terms**, and instead 'scoring' them against a modern set of ideas and values, scored as 'good' by the whiggish author » (Schuster, 1995, p. 15), *c'est nous qui soulignons.*

Cette réflexion appelle à de nouvelles recherches visant à étudier les conditions de possibilités didactiques d'un tel changement de posture et, ainsi, contribuer au champ émergent de la didactique de l'histoire des sciences.

Notre recherche se situe dans le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation. Dès à présent, discutons des spécificités de la reconstruction didactique expérimentée du point de vue de la problématisation engagée.

1.2. La problématisation dans notre reconstruction didactique

1.2.1. Les items de la grille d'analyse pensés comme des inducteurs de problématisation

La reconstruction didactique que nous avons expérimentée implique plusieurs problématisations. Lors de la séance de biologie, l'activité de problématisation fut cadrée par l'étude successive de chacun des articles et s'appuya sur les différents critères de la grille, que nous rappelons ici :

- objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés
- que sont les végétaux dans la classification ?
- place de deux espèces unicellulaires (euglène et diatomée) par rapport aux végétaux
- controverses entre auteurs
- justifications des choix de classification
- usage de l'homologie

- méthodologie de classification.

Cette grille a été conçue comme une aide à l'analyse des articles et au travail de problématisation. Une piste de recherche intéressante consisterait à étudier la fonction effective de chacun de ces items pour chacun des textes étudiés. Ces critères peuvent être pensés comme des inducteurs de problématisation, « c'est-à-dire des aides bien spécifiques, susceptibles d'activer les schèmes de l'élève et ceci par rapport aux différentes opérations du processus de problématisation et de leur contenu » (Fabre & Musquer, 2009, p. 112). Pour Michel Fabre et Agnès Musquer, les inducteurs visent à faciliter les opérations de repérage des « données pertinentes du problème et d'approcher progressivement (en essayant des hypothèses de solutions et en les critiquant) la condition du problème (la condition *sine qua non* de la résolution) » (Ibid., p. 116).

Lors de l'analyse du débat, nous nous sommes aperçus, que chaque item ne produit pas le même effet lors du débat pour chacun des articles. Nous sommes en droit de penser que, selon le problème travaillé dans chaque article, la fonction effective de chacun des items n'est pas identique. Le retour aux transcriptions du débat permettrait de caractériser le rôle joué par les différents items de la grille. Mieux comprendre la façon dont fonctionnent les items de la grille d'analyse dans leur fonction d'inducteurs peut contribuer à penser de façon plus précise des outils qui aident les étudiants à problématiser dans le cadre d'analyse d'articles scientifiques et plus largement de textes historiques.

1.2.2. La réalisation de la carte conceptuelle : une tâche impliquant plusieurs problématisations à la fois et l'articulation entre différents registres explicatifs

La reconstruction didactique s'est achevée par une activité de bilan qui a pris la forme d'une carte conceptuelle. La tâche s'est révélée éminemment complexe. Elle nécessite de rendre compte de plusieurs problématisations. En effet, une première problématisation est de nature épistémologique et historique : l'évolution temporelle du groupe des végétaux dans la classification et ses raisons. Une seconde problématisation est de nature biologique, elle vise à construire les problèmes en relation avec les différentes conceptions des végétaux. Elle s'inscrit dans différents registres explicatifs (écologique, phylogénétique) qui ne sont pas incompatibles entre eux, mais qu'il faut fixer pour problématiser.

Étant donné la complexité de la tâche, nous proposons de la faire évoluer en deux étapes. Une première carte pourrait porter exclusivement sur les différentes conceptions actuelles des végétaux afin de construire des problèmes de nature biologique. Une seconde carte porterait

sur le problème épistémologique et historique de l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux. Une mise en perspective des deux cartes pourrait être réalisée dans un dernier temps.

Soulignons que cette réflexion sur la combinaison de différents registres explicatifs reste à poursuivre car elle est assez peu travaillée dans les recherches actuelles sur la problématisation. En effet, dans de nombreux travaux, les élèves sont amenés à problématiser dans leur cadre « spontané » ou dans un cadre imposé. Cette perspective de recherche devrait nourrir la réflexion pour un programme didactique cherchant à ce que sciences biologiques et sciences historiques, sans se confondre, se rejoignent et se fécondent (Morange, 2011).

En conclusion de cette sous section, il apparaît que notre recherche contribue au développement du cadre théorique de l'apprentissage par problématisation de trois façons : par l'étude d'une problématisation articulant différents registres explicatifs ; par l'ouverture d'une réflexion sur la fonction d'inducteur de problématisation des items de la grille d'analyse des articles ; et enfin par la proposition de l'utilisation de cartes conceptuelles pour analyser la construction de problèmes des étudiants (cf. chapitre 4).

Dressons à présent le bilan des différentes méthodologies qualitatives et quantitatives développées dans le cadre de notre recherche.

1.3. Les méthodologies qualitatives et quantitatives en didactique

Notre recherche se caractérise par la mise en œuvre de différentes méthodologies, quantitatives et qualitatives. Nous souhaitons discuter ici de leur articulation de manière à éclairer les apports respectifs de chacune et leur complémentarité.

En premier lieu, il nous apparaît nécessaire de clarifier ce que l'on entend par quantitatif et qualitatif car une ambiguïté subsiste. La distinction réside-t-elle au niveau du nombre de données ou au niveau de l'approche d'analyse des données ?

Dans notre cas, l'étude des conceptions grâce au questionnaire est quantitative du point de vue du nombre de données (N=333). Par contre, elle est mixte au niveau de l'analyse, à la fois quantitative (étude statistique par ACM et classification hiérarchique) et qualitative, par l'étude de l'argumentation des étudiants.

L'analyse des débats conduits dans le cadre de la reconstruction didactique est clairement qualitative selon les deux critères. Il s'agit d'une étude de cas mettant en œuvre une analyse argumentative.

Enfin, l'étude des cartes conceptuelles nous semble intéressante pour éclairer cette réflexion méthodologique. Le nombre de cartes est faible (13), ce qui, au vu du premier critère, laisse envisager la nature qualitative de cette recherche. Mais la méthodologie combine deux approches quantitative et qualitative. La première se base sur le comptage des termes utilisés par les étudiants. Elle permet d'identifier les éléments de discours fortement utilisés et ceux qui le sont moins. Une matrice de présence des concepts clés dans chaque carte sert à la construction d'une classification hiérarchique et permet d'identifier des groupes de cartes ressemblantes. Parmi un ensemble de productions, l'étude quantitative peut aider à cibler des cartes dont l'élaboration sera étudiée de manière qualitative à partir des données vidéo. L'étude qualitative des cartes est, quant à elle, double. Elle porte tout d'abord sur l'analyse des propositions de chaque carte, puis sur le processus d'élaboration d'une carte conceptuelle donnée (étude de cas).

L'exemple de ces trois enquêtes illustre l'absence de superposition des deux critères de distinction des recherches quantitatives et qualitatives.

Concernant le premier critère, la recherche quantitative basée sur un grand nombre d'étudiants permet de dégager des régularités au niveau du raisonnement et de d'identifier des profils conceptuels. Il est important de souligner que les deux conceptions les moins représentées ne forment que 3 % de l'effectif total. Elles n'ont d'ailleurs pas été retrouvées lorsque le questionnaire a été donné à la promotion de 29 étudiants avant l'étude d'articles. Sur un petit effectif, ce faible pourcentage correspond à moins d'un étudiant ! Une étude sur un grand nombre s'avère indispensable dans le cadre d'une visée d'identification de profils. Mais l'analyse qualitative des réponses fut complémentaire en donnant accès à la logique des sous-groupes observés dans les analyses statistiques descriptives. Elle fut également nécessaire pour accéder plus finement aux raisons qui expliquent les dissonances entre les registres phylogénétique et fonctionnel analysées dans le cas de l'orobanche.

L'analyse du débat ainsi que l'étude de l'élaboration de la carte conceptuelle sont des études de cas. L'approche qualitative est particulièrement adaptée pour comprendre la dynamique du processus et l'importance des interactions. L'étude argumentative réalisée permet une finesse et une richesse d'analyse à laquelle ne donnerait pas accès une approche quantitative (étude lexicométrique, par exemple). Les analyses monologale et dialogale sont complémentaires pour accéder aux fondements argumentatifs et caractériser les différentes thèses en présence.

Outre la finesse de l'analyse argumentative en interaction offerte par une étude qualitative, une étude de cas est heuristique au sens où elle permet de générer de nouvelles questions de

recherche. Les exemples sont nombreux parmi notre recherche. Nous pouvons citer l'étude de l'élaboration de la carte conceptuelle qui a conduit à questionner le rôle que peut exercer ce type d'activité dans la double dialectique : local-global et court terme-moyen terme des apprentissages.

Les méthodes qualitatives et quantitatives sont complémentaires dans une relation dialectique. Ainsi, l'étude quantitative par questionnaire a permis de construire des profils conceptuels et d'identifier des difficultés, en orientant l'élaboration de la séquence expérimentée et analysée de façon qualitative. Au cours de cette enquête, l'argumentation des étudiants a pu être confrontée aux profils conceptuels mobilisés par les étudiants lorsque cela s'est avéré nécessaire. Cette enquête généra des résultats et de nouvelles questions de recherches pouvant être à nouveau étudiées dans une dialectique : quantitative–qualitative.

Si les études de cas permettent une exploration en profondeur des phénomènes d'enseignement et d'apprentissage, elles posent cependant la question de la dimension cumulative de ce type de recherche. À l'échelle de la communauté des didacticiens des sciences, cette réflexion nous semble importante à travailler. L'élaboration d'un programme de recherche collectif aurait pour objectif d'articuler davantage les nécessaires recherches de type étude de cas avec des recherches quantitatives. Cette combinaison d'approches qualitatives et quantitatives produirait ainsi une nouvelle méthodologie qui conjugue les apports respectifs des deux types de recherche. La question posée ici est celle de la robustesse des résultats de recherche et de leur degré de généralisation, en identifiant notamment les effets de contexte et en évaluant le caractère spécifique ou général des raisonnements et difficultés mis au jour.

Dès maintenant, dressons une synthèse des différentes enquêtes concernant le raisonnement des étudiants, relatif au groupe des végétaux et aux classifications biologiques, qui correspond au premier centre d'intérêt de cette thèse.

2. Discussion sur le raisonnement des étudiants concernant le groupe des végétaux et les classifications biologiques

L'étude du raisonnement des étudiants concernant le groupe des végétaux et la diversité des classifications biologiques constitue un enjeu majeur de cette recherche doctorale. Nous entendons mettre en perspective les résultats des différentes enquêtes. Une synthèse des obstacles dégagés par notre recherche sera présentée dans un second temps. Pour chaque mode de raisonnement, nous déterminerons son instanciation dans la sphère didactique et dans la sphère historique.

2.1. De l'enquête didactique sur les conceptions à la reconstruction didactique

Successivement, nous discuterons des résultats obtenus dans l'enquête didactique par questionnaire, dans la reconstruction didactique pour les conceptions des végétaux, puis les modes de raisonnement classificatoire. Pour finir, nous porterons notre attention sur les relations entre les activités de définition et de classification tant au niveau didactique qu'historique.

2.1.1. Les conceptions des végétaux : comparaison de l'étude par questionnaire avec les cartes conceptuelles

- **Un bilan des conceptions inférées de l'étude par questionnaire**

L'étude par questionnaire a été l'occasion de distinguer sept conceptions différentes des végétaux dans le cadre d'une situation ouverte de classification.

Selon nous, il est important de rappeler qu'une conception ne correspond pas, à la seule définition des végétaux en réponse à la première question, mais à un ensemble de connaissances et un type de raisonnement donné que nous inférons à partir des deux premières questions. Chaque conception permet de répondre à un ou plusieurs problèmes, de nature structurale, fonctionnelle ou phylogénétique. Le type de problèmes fondant une conception est rarement explicite mais inféré à partir des différentes réponses, en particulier de la nature des caractères utilisés pour le regroupement des espèces au sein des végétaux.

Si, pour les deux premières questions, certains étudiants ont une seule ligne de réponse, d'autres changent de conception selon la situation. Confrontés à une espèce posant un problème non envisagé jusqu'alors, des étudiants modifient leurs réponses et basculent vers

une autre conception des végétaux, plus ou moins proche de la première. Nous citerons trois exemples de cette adaptation de la réponse au type de situation.

Nous avons ainsi montré un élargissement de la vision macrocentrée chez plusieurs étudiants qui réduisaient les végétaux aux seules plantes à fleurs dans un premier temps, puis soumis à d'autres plantes terrestres (comme une fougère), ils ont élargi leur conception à l'ensemble des plantes terrestres. D'autres, mobilisant une conception fonctionnelle et cellulaire des végétaux, ont été conduits à exclure l'euglène ou la diatomée en raisons de caractéristiques non avancées précédemment comme, par exemple, l'immobilité ou la présence d'une paroi cellulaire. Enfin, face à une plante à fleurs non chlorophyllienne, l'orobanche, un nombre élevé d'étudiants utilisant une conception fonctionnelle (s.l.) basée sur la photosynthèse a basculé vers une conception strictement cellulaire : « sont végétaux les organismes possédant des cellules avec des plastes, même non chlorophylliens ». Cette conception est émergente au sens où celle-ci n'avait pas été envisagée à l'issue de notre analyse *a priori*.

Soumis à une question explicitement écologique, dans une très large majorité les étudiants montrèrent qu'ils disposaient de connaissances écologiques, avançant de nombreux arguments dont les deux plus fréquemment évoqués sont que les végétaux sont à la base des réseaux trophiques (75 %[186]) et sont des producteurs primaires (61 %). Face à un problème écologique, ils mobilisent alors une conception écologique. Ils développent une argumentation dans laquelle les végétaux occupent une place particulière dans les écosystèmes en assurant des fonctions spécifiques. Il est noté que la plupart d'entre-eux (76 %) avait nullement évoquée jusque-là des arguments du registre écologique.

Dans le cadre d'une question résolument phylogénétique, 35 étudiants (12 %) répondent que les végétaux forment un groupe valide dans la phylogénie actuelle, i.e. un groupe monophylétique. Ces étudiants avancent donc une conception de nature phylogénétique, argumentée de différentes façons comme le partage de caractères spécifiques qui leurs sont propres ou celui d'un ancêtre commun. Pour la majorité des étudiants (70,5 %), à l'inverse, les végétaux n'existent plus dans la classification phylogénétique actuelle et ne forment pas un groupe valide.

Enfin, signalons que très peu d'étudiants (11) indiquent l'existence de plusieurs conceptions des végétaux, explicitant alors la nature polysémique du concept de végétal.

[186] Rappelons que les pourcentages indiqués ici sont calculés par rapport à l'effectif de 295 étudiants « non indécis »

- **Comparaison avec les conceptions des végétaux présentes dans les cartes conceptuelles**

L'objectif essentiel de la reconstruction didactique est à la fois de permettre aux étudiants une prise de conscience de l'existence d'une multiplicité de conceptions des végétaux, et d'articuler chacune d'elles avec le contexte problématique approprié. Les quatre articles qui leur ont été soumis visent à débattre de différentes conceptions. Les deux extraits d'articles d'écologie qui portaient sur le phytoplancton et le cycle du carbone, font appel à une conception fonctionnelle des végétaux basée sur la réalisation de la photosynthèse oxygénique, assurant un flux de carbone entre différents réservoirs. Les trois autres articles portaient sur la systématique des Eucaryotes. Ils permettent d'étudier l'histoire des idées concernant la classification de façon générale et, de façon plus particulière, le groupe des végétaux.

Plusieurs conceptions des végétaux sont mises en débat autour de ces trois articles. Celui de Whittaker (1969) présente une conception mixte (ou éclectique) des végétaux associant des caractères structuraux et fonctionnels, combinés à une ambition évolutive, mais pas phylogénétique. Se situant par rapport aux classifications précédentes, l'analyse de ce premier article permet de discuter du système à deux règnes opposant animaux et végétaux. Cavalier-Smith (1981) poursuit un objectif phylogénétique, mais pas dans le sens moderne défini par la cladistique. Pour cet auteur, les végétaux forment plusieurs règnes indépendants. Dans l'article phylogénomique de Burki (2014), les végétaux n'apparaissent plus dans l'arbre proposé. Ils ne sont discutés que dans l'introduction, laquelle présente les problèmes posés par les classifications antérieures. L'existence de différentes lignées possédant des plastes et l'origine multiple de ces organites seront largement discutées. Le groupe Plantae (ou Archaeplastida) désigne un groupe monophylétique qui permet d'envisager la conception phylogénétique réduite des végétaux.

La reconstruction didactique s'acheva par une séance de synthèse durant laquelle les étudiants, mis en binôme, réaliseront une carte conceptuelle dressant « le bilan des différentes conceptions des végétaux en tant que groupe biologique et expliquant comment et pourquoi ont évolué ces conceptions ».

Cette étude des cartes conceptuelles permet d'identifier les différentes conceptions des végétaux que les étudiants incluent dans leur production, conceptions que l'on peut comparer à notre première enquête didactique. Soulignons cependant que l'inférence des conceptions à partir d'une carte conceptuelle reste difficile en raison de son caractère relativement

schématique dans laquelle l'argumentation se trouve réduite à des propositions mises en réseau. Si les cartes donnent facilement accès à une description des végétaux, il est moins aisé d'inférer les modes de raisonnement sous-jacents. Ainsi, nous formulerons les descriptions en terme de conceptions, tout en considérant important de n'utiliser cette notion de conception qu'avec une certaine prudence dans ce contexte particulier.

Cette réserve étant formulée, nous avons constaté que les cartes présentent une multiplicité de conceptions des végétaux. Seule une carte (B3) se distingue des autres en ne présentant que les raisons de l'évolution historique des idées, ce qui correspond à la seconde partie de la consigne. En moyenne, une carte comprend 3,1 conceptions différentes des végétaux. La conception phylogénétique est présente dans toutes les cartes, à l'exception de la carte B3, très particulière. Ce résultat est à mettre en relation avec l'importance du travail concernant les trois articles de systématique des Eucaryotes. La conception fonctionnelle et écologique, quant à elle, se trouve présente dans 9 cartes sur 13 (soit 69 %). Si le nom de Whittaker est cité par 12 cartes sur 13, la conception mixte à dominante écologique qui résulte de son système est explicitement mentionnée par quatre cartes sur 13 (soit 31 %).

Trois autres conceptions apparaissent également dans les cartes, bien que n'ayant pas été travaillées lors de l'analyse des articles. Elles seraient donc l'expression des connaissances des étudiants permise par une consigne volontairement très ouverte. La plus fréquente des trois est la conception cellulaire et fonctionnelle (CFC), visible dans 69 % des cartes. Ce résultat est frappant car il s'agit d'une conception apparue comme dominante dans la première enquête didactique par questionnaire. L'analyse des articles n'a pas donné l'occasion de discuter de cette conception non enracinée sur un plan historique. Elle réapparaît en fin de séquence dans ce nouveau recueil de données. Ce résultat suggère la nécessité d'introduire en formation un travail explicite de cette conception, mais sans l'appui de textes historiques, de façon à ce que les étudiants puissent questionner les fondements et cerner son domaine de validité.

Une autre conception surgit dans les cartes bien que non travaillée durant la reconstruction didactique : il s'agit d'une conception morpho-anatomique définissant les végétaux par leur organisation, comme la présence d'une tige feuillée, le cormus ou d'un thalle (4 cartes, soit 31 %). Cette conception manifeste une certaine proximité avec la conception fonctionnelle macrocentrée (CFM) dégagée dans l'étude initiale.

Enfin, il apparaît une troisième conception non discutée dans le cadre de la formation expérimentée, à savoir une conception utilitaire et anthropocentrée. Cette dernière reste cependant moins représentée : 3 cartes sur 13 (soit 23 %). Elle n'était nullement apparue dans

l'étude précédente. Cette différence pourrait s'expliquer par la nature de la consigne, celle-ci appelant explicitement à envisager la pluralité de conceptions des végétaux, ce qui n'était pas le cas du questionnaire. Il s'agirait d'une nouvelle confirmation de l'importance de la situation dans la production réalisée par les étudiants.

Signalons que la conception par opposition, distinguant les animaux des végétaux, est absente des cartes, bien qu'ayant été succinctement discutée dans l'épisode dédiée aux controverses relatives aux classifications antérieures.

La pluralité de conceptions des végétaux est sous-tendue par une diversité de classifications biologiques présentant chacune des spécificités. Quelles informations apportent nos différentes enquêtes concernant la compréhension des étudiants relative au raisonnement classificatoire ?

2.1.2. Le raisonnement classificatoire

- **L'articulation entre les raisonnements phylogénétique et fonctionnel dans l'étude par questionnaire : le cas de l'orobanche**

À la suite de l'enquête exploratoire et comme nous nous y attendions, l'orobanche a constitué une situation problématique féconde dans l'identification du type de raisonnement classificatoire mis en jeu. Cette plante à fleurs est considérée comme végétale par la quasi-totalité des étudiants (93,5 %), bien que non chlorophyllienne. Ce résultat interroge le raisonnement mis en œuvre par les étudiants ayant mobilisé jusque-là les conceptions fonctionnelles CF, CFC et CFM1, largement dominantes chez les étudiants au nombre de 170, soit 57,6 %. En effet, la perte de la fonction photosynthétique devrait entraîner logiquement la sortie de cette espèce du groupe fonctionnel. Or, cette perte secondaire est permise dans un registre phylogénétique. Considérer l'orobanche comme végétale peut être interprété comme une dissonance entre deux logiques explicatives distinctes.

De manière à préciser leur logique de réponse, nous avons étudié la justification apportée par les étudiants fonctionnalistes ayant répondu par ailleurs que les végétaux ne constituaient pas un groupe monophylétique. 38 étudiants avancent l'argument que l'orobanche est végétale car la perte de chlorophylle reste une perte secondaire au sein du groupe des végétaux (cf. p. 148). L'argumentation rend explicite le recours mal contrôlé au raisonnement phylogénétique appliqué pour un groupe fonctionnel.

La situation problématique de l'orobanche n'a pas été retravaillée dans le cadre de la reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences. Mais le débat centré sur les

différents systèmes classificatoires aura permis de voir, dans un autre contexte, la façon dont les étudiants comprennent les logiques classificatoires, que nous allons synthétiser maintenant.

- **Les dissonances entre les deux types de raisonnement classificatoire constatées lors de la reconstruction didactique**

Comprendre la pluralité du groupe des végétaux selon les différentes classifications passe par le repérage des différents usages de l'homologie dans les différents articles. Cela nous conduira à focaliser l'attention des étudiants sur l'homologie par l'intégration d'un item spécifique dans la grille d'analyse des quatre articles. Cependant, l'analyse du débat a montré que les étudiants font un recours inopportun à une hypothèse d'homologie dans un contexte fonctionnel (articles d'écologie), bien que la question de l'évolution biologique soit totalement absente des deux textes étudiés.

Le débat portant sur l'article de Cavalier-Smith fut l'occasion de suivre un épisode très intéressant et totalement imprévu concernant le problème de la non-monophylie des végétaux. Les étudiants expliquent la polyphylie des végétaux en convoquant un registre explicatif qui mêle à la fois des principes phylogénétiques (n'accepter comme valides que des groupes monophylétiques) et des principes qui relèvent d'une classification fonctionnelle (regrouper des espèces partageant toutes une même fonction). La différence de registre explicatif entre les étudiants et T. Cavalier-Smith se trouve à l'origine de deux problématisations différentes qui, pourtant, conduisent à une même nécessité : la séparation des végétaux en plusieurs règnes distincts. Ces deux exemples révèlent toute la difficulté des étudiants dans la prise en charge les principes spécifiques de chaque classification dans un contexte approprié, fonctionnel ou phylogénétique (cf. p. 335). Cette difficulté nous semble être de même nature que celle qui est à l'origine de la dissonance analysée dans le cas de l'orobanche.

Enfin, nous tenons à souligner le déficit dans la compréhension des fondements de la méthode cladistique, déficit constaté lors du débat sur les méthodes de classification utilisées par les différents auteurs. À plusieurs reprises, les étudiants associent uniquement l'étude des caractères moléculaires à la phénétique et non à la cladistique, alors que la différence entre ces méthodes ne réside pas au niveau du type de caractères utilisés. La compréhension du processus de polarisation des caractères semble insuffisante. Des étudiants confondent le codage de l'absence ou de la présence d'un caractère avec le processus de polarisation, processus qui requiert la comparaison avec l'état du caractère dans un groupe externe. Malgré les enseignements en phylogénie qui ont précédé notre reconstruction didactique, et malgré

les interventions de l'enseignant durant le débat qui se sont révélées nécessaires, nous avons constaté que des difficultés relatives à la cladistique persistent dans certaines cartes conceptuelles. Ce résultat suggère deux nécessités : la première de travailler davantage les fondements épistémologiques de la cladistique et la seconde d'élaborer des activités contribuant à une meilleure compréhension du processus de polarisation des caractères.

Les trois enquêtes ont montré que les relations entre les deux activités de définition et de classification entretiennent des relations complexes, tant au plan didactique qu'historique. Nous entendons faire le point sur les résultats de notre recherche relatifs à ces deux processus que sont définir et classer.

2.1.3. Définir et classer

- **Étude historique du rapport entre définition et classification**

Notre analyse de différents systèmes classificatoires révèle l'attachement de certains auteurs, comme H. F. Copeland ou R. H. Whittaker, à ce que la classification soit associée à une définition claire des groupes systématiques. Les définitions proposées par ces auteurs sont de différents types. Celle concernant les végétaux, proposée par Copeland, se présente comme une combinaison de caractères nécessaires (cf. p. 255). Il s'agit d'une définition conjonctive de nature aristotélicienne. Mais la définition d'autres groupes de la classification de Copeland s'en distingue, comme pour le groupe Protista. Il se présente tantôt comme un groupe polythétique, défini par un cluster de propriétés non nécessaires pouvant disparaître dans certaines lignées, et, à d'autres moments, il est défini de façon gradiste par l'absence de la combinaison entière de caractères définissant les végétaux ou les animaux.

Whittaker propose quant à lui une définition des végétaux constituée d'un mélange divers de ressemblances dont certaines sont homologues alors que d'autres sont homoplasiques (mode de vie). Certains traits sont présentés comme nécessaires à la définition du groupe alors que d'autres non, comme l'indiquent des modalisateurs du type « frequently », « principal » ou « primarily ».

Les classifications mobilisant les fondements cladistes manifestent un rapport différent à la définition. En effet, la phylogénie est élaborée puis, *a posteriori* de l'analyse, les groupes sont identifiés, nommés et définis. Dans cette approche nominaliste, la classification précède la définition des groupes. Certains groupes, comme les SAR, ne sont pas définis par des caractères structuraux facilement définissables, mais uniquement pas des synapomorphies moléculaires. Un clade forme un groupe défini sur la base de synapomorphies, dont la

présence est suffisante, mais non nécessaire, chez tous les membres du groupe puisque tout caractère peut voir son état évoluer au sein de la lignée.
La relation entre les deux activités : définir et classer, dépend donc étroitement du positionnement théorique dans lequel se situe une classification donnée.

- **Le problème de la définition d'un groupe dans une classification phylogénétique**

Le débat portant sur l'article de F. Burki (2014) se révéla particulièrement intéressant concernant la définition des végétaux donnée par cet auteur. Il donna lieu à un épisode fortement argumentatif avec une opposition entre trois thèses relatives à l'existence ou non des végétaux (cf. p. 347).
Dans une approche essentialiste, certains étudiants cherchèrent à plaquer une définition des végétaux, considérant que « forcément les végétaux existent ». En profond désaccord, d'autres étudiants avancèrent la non existence du groupe des végétaux dans l'arbre phylogénétique présenté par cet auteur, ou bien la réduction des végétaux à une lignée monophylétique : les Archaeplastida (Plantae), dans une approche nominaliste.
Cette controverse entre les étudiants montra une différence nette de rapport à la définition. Dans le premier cas, celle-ci pré-existe à la classification contrairement au deuxième cas.

- **Disjonction entre la définition des végétaux et les classification dans plusieurs cartes conceptuelles**

Seules 5 cartes sur 13 (soit 38 %) établissent clairement la relation entre les différentes classifications et les multiples conceptions des végétaux. La majorité des cartes réalise une disjonction entre la description multiple des végétaux et les classifications biologiques.
Par ailleurs, deux cartes (B8 et A7, dont le processus d'élaboration a été largement étudié) présentent un paradoxe entre une définition « absolue » des végétaux dans l'une des branches de la carte et l'existence d'une multiplicité de conceptions dans d'autres branches. La photosynthèse semble envisagée comme un critère absolu de définition des végétaux.

- **Une définition d'encyclopédie**

Lors du débat portant sur l'extrait écologique relatif au phytoplancton, à plusieurs reprises les étudiants avaient avancé l'idée que Gasparini ne réalise pas de classification mais cherche uniquement à définir le plancton. Ils opposent alors les deux activités de définition et de classification, pourtant compatibles. Afin de justifier cette disjonction, ils mettent en avant la

source encyclopédique du texte étudié, et cela de manière récurrente au cours du débat (cf. p. 379).

> « c'est juste **une définition** que donne une encyclopédie un cours approfondi » (Pierrik, 41)

Cette citation pourrait laisser accroire qu'une définition proposée par une encyclopédie serait forcément aproblématique et sans lien avec un processus de classification.

Ces trois exemples de résultats de nos enquêtes didactiques permettent l'identification d'importantes difficultés concernant les relations entre les activités de définition et de classification. De façon rétrospective, ils conduisent à nous interroger sur la première question de notre enquête par questionnaire : « Définissez les végétaux ».

- **Analyse critique de la première question de l'enquête didactique**

La première question de l'enquête nationale appelle à une définition des végétaux. Étant données les difficultés concernant la relation entre définition et classification, il semble légitime de se demander si une autre formulation de la question aurait donné lieu à des réponses différentes, en remplaçant par exemple le terme « définir » par le terme « caractériser ».

De plus, l'ordre des deux premières questions peut éventuellement influencer la définition proposée par les étudiants si celle-ci arrive non au début du questionnaire, mais après l'actuelle deuxième question. En effet, le positionnement des treize espèces par rapport au groupe des végétaux est une activité qui nécessite de problématiser le partage de ressemblances.

Une nouvelle enquête semble nécessaire afin d'apporter des éléments de réponse à ce nouveau questionnement.

Dans chacune des trois enquêtes, les modes de raisonnement pouvant faire obstacle ont été analysés. Nous entendons en dresser une synthèse dans la section suivante.

2.2. Bilan sur les principaux modes de raisonnement pouvant faire obstacle

Loin de céder à une vision récapitulationniste naïve, nous désirons comparer la forme particulière que prennent les différents modes de raisonnement dans la sphère didactique et dans la sphère historique (cf. tableau 82).

Mode de raisonnement	**Actualisation didactique**	**Actualisation historique**
Pensée catégorielle : pensée par couples avec une opposition binaire	11 étudiants incluent les champignons parmi les végétaux (conception par opposition), parmi eux 6 argumentent par la présence d'une paroi, absente chez les animaux => Justification différente de la vision duale linnéenne	• Distinction animaux - végétaux (Linné, 1735) basée notamment sur l'immobilité • Distinction Protista - Histonia sur la base de l'organisation uni ou pluricellulaire (Haeckel, 1904) et, dans chaque règne, division basée sur le mode de nutrition : Protozoa - Protophyta et Metazoa - Metaphyta • Distinction Procaryotes - Eucaryotes (Chatton, 1925) sur la base de l'organisation cellulaire (nucléée ou anucléée)
Pensée prototypique à l'échelle cellulaire : « la » cellule végétale Manifestation possible de l'obstacle transversal de la pensée typologique	Mise en avant de « la » cellule végétale, prototype cellulaire (conception fonctionnelle et cellulaire, largement dominante avec 121 étudiants). Nombreux schémas cellulaires spontanés pour définir les végétaux. Origine didactique : nombreux manuels et enseignements distinguant « la » cellule animale et « la » cellule végétale	Aucune classification ne forma un règne végétal comprenant l'ensemble des organismes (unicellulaires compris) possédant des cellules eucaryotes possédant des plastes. La conception fondée sur un prototype cellulaire ne tire pas ses racines au niveau historique.
Essentialisme Manifestation possible de l'obstacle transversal de la pensée typologique	• Orobanche végétale pour la quasi-totalité des étudiants. Les plantes à fleurs sont forcément des végétaux. • Souris : certaines réponses ironiques (« Est-il réellement utile d'argumenter ? ») • Débat sur l'article de Burki (2014) : « Forcément les végétaux existent » • Entretiens exploratoires (Bosdeveix & Lhoste, 2014) : la photosynthèse est un caractère nécessaire pour définir le groupe des végétaux (au sens d'une définition aristotélicienne) => Recours possible à une pensée essentialiste (ontologique) conduisant à réifier des groupes systématiques dont l'existence ne serait pas questionnée,	Débats historiques sur la nature réelle ou artificielle des taxons, notamment l'espèce. Distinction entre essentialismes ontologique et épistémologique (ou méthodologique) Remise en question par certains historiens du recours de systématiciens comme Linné à un essentialisme aristotélicien (caractères nécessaires et toujours présents) lors de l'utilisation du type. Définitions de taxons semblant essentialistes (e.g. végétaux de Copeland) mais cette hypothèse ne résiste pas à une analyse globale de la logique de l'auteur.

	alors même que les groupes sont des constructions humaines	
Macrocentrisme Manifestation possible de l'obstacle transversal « primat de la perception sur la conceptualisation »	Focalisation sur les macro-organismes pluricellulaires excluant les micro-organismes (conception fonctionnelle macrocentrée 1 avec 22 étudiants), voire réduisant les végétaux aux plantes terrestres (CFM2 avec 9 étudiants). Forte dépendance de ce mode de raisonnement à la situation : conception réduite aux plantes à fleurs en première question s'élargissant ensuite.	Place des micro-organismes très largement minorée dans le développement de la systématique au XX^{e} siècle. Aucun microbiologiste dans l'ouvrage majeur *The New Systematics* (1940) dirigé par J. Huxley. 4 pages seulement consacrées aux micro-organismes dans *Growth of Biological Thought* (1982) de E. Mayr, comportant près de 1000 pages. => Cécité à l'égard des micro-organismes liée à un effet d'échelle (Gould, 1996)
Importance accordée à la couleur verte de l'organisme Manifestation possible de l'obstacle transversal « primat de la perception sur la conceptualisation »	Couleur verte interprétée comme liée à la seule présence de chlorophylle et non par une association pigmentaire. Conduit à considérer des algues rouges et brunes comme non chlorophylliennes (6 étudiants). Difficulté de compréhension de l'expression « Lignée verte » (15 étudiants restreignant aux organismes verts)	Raisonnement non observé dans notre analyse historique des classifications
Hiérarchie du vivant, gradisme Manifestation possible de l'obstacle transversal « valorisation et dévalorisation »	Groupes supérieurs et inférieurs : idée d'une hiérarchie des êtres vivants ou d'un degré d'évolution (12 étudiants)	Échelle des êtres ou *Systema Naturae*, présente chez Platon et Aristote, développée par G. W. Leibniz, au XVII^{e} siècle. L'idée de progrès se combine avec la pensée évolutionniste dans le gradisme. Se manifeste dans les arbres du vivant jusqu'aux cladogrammes.
Importance accordée au cloisonnement disciplinaire distinguant biologie animale et végétale	Une espèce est végétale car étudiée dans l'enseignement de biologie végétale (5 étudiants) => Origine didactique (conséquence d'un choix d'enseignement) ? Raisonnement lié au cloisonnement disciplinaire (existant dans l'enseignement et au delà) => Origine sociologique (au sens de la	Raisonnement non trouvé à l'identique au niveau historique, mais il est légitime de se demander à quel point l'existence d'un champ disciplinaire institué, la botanique incluant la mycologie, a pesé dans les classifications et dans l'inclusion des champignons au sein du règne végétal, qui a perduré jusqu'à récemment (Whittaker, 1959)

	sociologie des sciences) ?	
Association entre la méthode phénétique et l'utilisation de caractères moléculaires	Durant le débat et la réalisation des cartes conceptuelles, plusieurs étudiants associeront l'utilisation de caractères moléculaires à la seule méthode phénétique. Difficulté conceptuelle ou obstacle didactique ? Manque de compréhension des fondements de la cladistique et / ou produit d'une forme d'enseignement où la phénétique est présentée par des comparaisons moléculaires (e.g. UPGMA) alors que la cladistique est le plus souvent travaillée avec des matrices de caractères structuraux ?	Raisonnement non observé dans notre analyse historique des classifications. Mais la phénétique s'est historiquement développée avec l'accès aux données moléculaires à partir des années 1960.

Tableau 82 : synthèse des modes de raisonnement pouvant faire obstacle et leur instanciation

Rappelons que chacun de ces modes de pensée forme un appui, une aide pour raisonner dans certaines situations mais, dans d'autres, il peut constituer un obstacle. Il l'est lorsqu'il conduit à stopper le questionnement et il devient, alors, la cause d'une « inertie de la pensée » (Bachelard, 1938/1993).

L'origine de ces types de raisonnement est variée. Certains s'instancient à la fois dans la sphère historique et didactique et peuvent être qualifiés d'obstacles épistémologiques. Il s'agit par exemple de la pensée catégorielle. L'étude de l'instanciation de ce raisonnement montre que les étudiants incluent les champignons au sein des végétaux pour des raisons cellulaires différentes de celles de Linné.

D'autres se manifestèrent uniquement dans nos enquêtes didactiques, sans que l'on ne trouve de trace évidente dans l'étude de l'histoire de la systématique. C'est le cas par exemple de l'association exclusive entre la couleur verte de l'organisme et la présence de chlorophylle.

Certaines formes de raisonnement peuvent tirer leur origine - du moins partiellement - de choix d'enseignement. Il pourrait s'agir de la dichotomie entre cellule animale et végétale ou encore de l'association entre phénétique et caractères moléculaires. Dans ce cas, l'obstacle peut être qualifié de didactique.

Le recours à l'existence de champs disciplinaires institués (botanique et zoologie) est qualifié, à la suite de certains auteurs (Clément, 2014), d'obstacle sociologique.

Ces différents modes de raisonnement ne jouent pas nécessairement de façon isolée mais peuvent se combiner dans certaines situations. J-P. Astolfi & B. Peterfalvi (1993) avaient modélisé cette relation sous forme d'un triangle et parlaient de nœud d'obstacles. Dans le cas

de notre recherche, nous proposons une représentation sous forme hexagonale (cf. figure 100). Il s'agit d'une première tentative de formalisation mais elle mérite d'être discutée. En effet, il n'est pas certain que les six sommets de cette figure soient tous en interaction et qu'ils soient de même niveau. Si certains obstacles sont transversaux, d'autres semblent plus « locaux », comme l'association exclusive entre caractères moléculaires et la méthode phénétique.

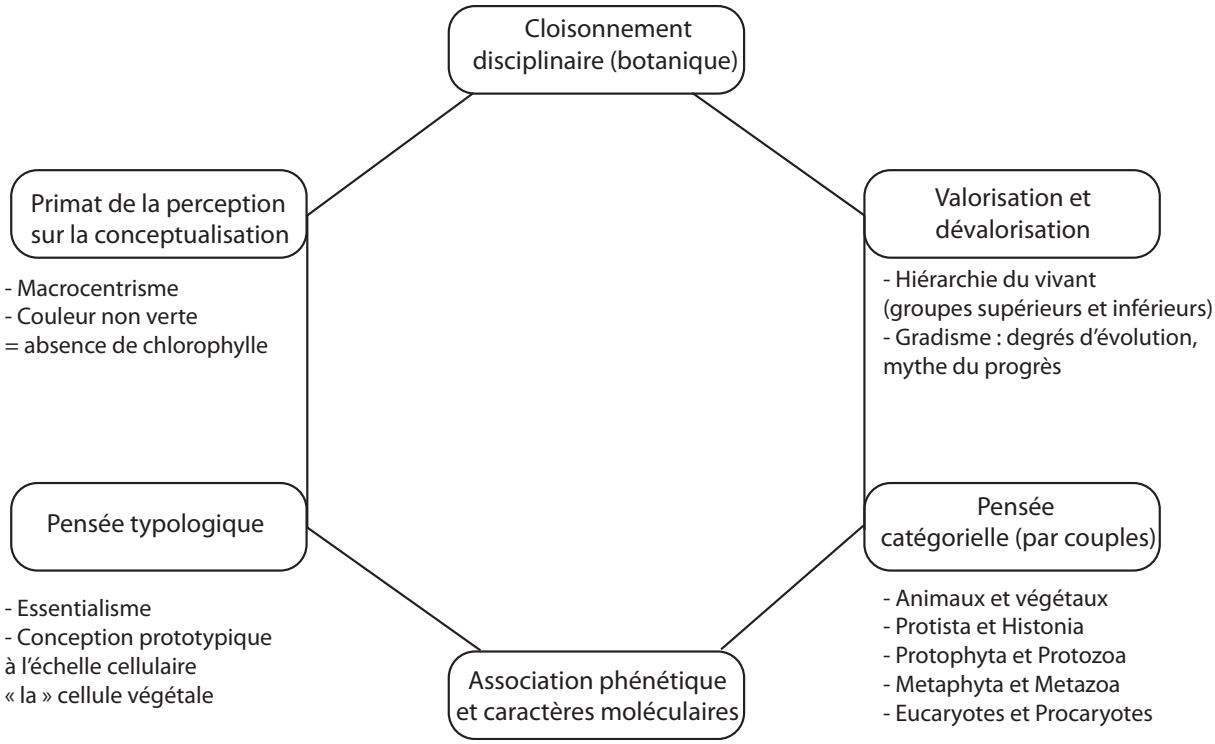


Figure 100 : hexagone des raisonnements pouvant faire obstacle concernant les classifications

Pour achever cette discussion, dressons les contours de quelques implications de notre recherche sur l'enseignement et la formation.

3. Implications pour l'enseignement et la formation

Cette recherche aura pris pour exemple les végétaux. Nous souhaitons montrer que notre recherche possède une portée plus large vis-à-vis des groupes biologiques concernés. Ensuite, nous discuterons des conséquences de cette étude pour l'enseignement universitaire et la formation des enseignants, d'une part, et pour l'enseignement secondaire, d'autre part.

3.1. Une plus large portée des résultats de cette recherche à d'autres groupes biologiques

L'exemple des végétaux n'est pas le seul à présenter une différence de signification selon le type de classification.

Le groupe des champignons, des animaux ou encore celui des algues présentent deux acceptions différentes selon que l'on s'intéresse à une question phylogénétique ou à une question fonctionnelle. Défini au sens large et fonctionnel, chacun de ces groupes désigne une stratégie trophique (Selosse, 2008) et est polyphylétique. Il est nécessaire de tronquer ces groupes en les réduisant à certains de leurs représentants afin de délimiter des groupes monophylétiques.

Les champignons au sens fonctionnel désignent une stratégie trophique en milieu terrestre, de type hétérotrophe absorbotrophe, via des filaments mycéliens (ou hyphes). Trois façons de se nourrir peuvent être distinguées : le saprophytisme, la symbiose et le parasitisme. Au sens phylogénétique, les Eumycètes constituent une lignée monophylétique, mais les Oomycètes (comprenant notamment l'agent du mildiou) appartiennent à une autre lignée, les Straménopiles.

Les algues désignent également une stratégie trophique mais en milieu aquatique et de type autotrophe. Au sens phylogénétique, nous avons eu l'occasion d'indiquer leur polyphylétisme et la nécessité de distinguer phylogénétiquement chacun des groupes d'algues : vertes, rouges et brunes.

Les animaux correspondent à une autre stratégie trophique de type phagotrophe, la phagocytose étant permise par l'absence de paroi. Au sens phylogénétique, seuls les animaux pluricellulaires (Métazoaires) sont monophylétiques alors que les animaux unicellulaires (ex protozoaires) appartiennent à différentes lignées.

Comme pour les végétaux, il est intéressant de noter que l'histoire de ces concepts peut permettre d'accéder aux raisons de la prise de distance entre la signification fonctionnelle et phylogénétique de ces groupes.

Il semble donc qu'une prise de recul sur la diversité des significations des groupes biologiques en fonction du type de classification concerne de nombreux cas de figure, au-delà de l'exemple ayant fait l'objet de cette thèse.

3.2. Implications didactiques de cette recherche

3.2.1. Définir et classer : un enjeu de formation

Comme nous l'avons vu précédemment, définir et classer constituent deux activités distinctes mais toutefois connexes. Notre recherche montre les difficultés rencontrées par les futurs enseignants de SVT pour clarifier la relation entre ces deux processus. Un véritable enjeu de formation se dégage de ce constat. En leur qualité d'enseignant, ils auront à faire travailler les classifications biologiques à leurs élèves et à définir de nombreux concepts. L'activité de définition occupe une place importante dans l'enseignement et se caractérise par des spécificités selon les disciplines (e.g. Ouvrier-Buffet, 2006 concernant les relations entre définition et classification en mathématiques et en sciences). Les spécificités des types de définition sont liées aux façons d'agir-parler-penser dans chaque discipline et dépend des savoirs en jeu.

Il nous semble donc primordial que les futurs enseignants acquièrent un certain recul face à la diversité des définitions et à leur place dans l'activité scientifique.

Si dans une approche cladistique, la définition des groupes résulte de la classification, il n'en est pas toujours ainsi. Dans certains cas, la définition des concepts devient première pour conduire un raisonnement dans lequel ce concept est un outil pour penser un réseau conceptuel plus vaste. Un concept-outil est alors défini, au sens où il se caractérise par un ensemble d'attributs permettant de délimiter ses limites et en faire un usage raisonné. Le processus de définition n'est pas neutre. Il se trouve orienté par le problème dans lequel le concept sera utilisé. Ainsi, dans certaines situations, la définition est la solution du problème alors que dans d'autres, la définition permet de poser le problème.

Un enjeu de formation pourrait alors consister à questionner le statut de certaines définitions « aproblématiques » dans des ouvrages, et qui associent un ensemble d'éléments descriptifs de statuts variés, telle une liste « à la Prévert ». Ce type de définition donne l'impression que celle-ci rassemble tout ce que l'on sait sur un concept sans que l'on ne comprenne réellement ce qui fonde cette association éclectique d'éléments définitoires.

3.2.2. Une vigilance à l'ambiguïté

Cette thèse soulève le problème de l'évidence d'usage du concept de végétal dans l'enseignement, problème qui est utilisé dans des acceptions variées suivant les disciplines et le contexte problématique. La polysémie de ce concept peut être une source d'ambiguïté si nous ne la contrôlons pas. Aussi, la conscience de ce problème suscite une vigilance face à l'ambiguïté du terme végétal. La formulation de la signification du terme pourrait aider les apprenants à lever les implicites dont ils n'ont pas conscience. Cela revient concrètement à préciser le contexte d'usage du terme végétal. Par exemple, les végétaux au sens fonctionnel ou au sens phylogénétique (réduits aux Archaeplastida), voire même à utiliser un terme plus précis s'il convient davantage à la situation étudiée, comme Embryophytes, Angiospermes, etc. En effet, si la réflexion sur la portée du modèle étudié se trouve laissée à la charge des étudiants, le risque est grand que ce processus de généralisation soit mal contrôlé.

3.2.3. Articuler les différentes conceptions des végétaux et identifier leur domaine de validité et leur contexte d'utilisation

L'existence d'une diversité de conceptions des végétaux, dont plusieurs sont valides scientifiquement dans un contexte donné, nous conduit à envisager l'apprentissage comme une prise de recul concernant le domaine de validité de chacune et le type de problème auquel elles répondent. L'objectif de la formation concernant ce concept polysémique n'est donc pas d'opérer un changement conceptuel pour faire passer les étudiants d'une conception A, éloignée des savoirs scientifiques de référence, à une conception B, plus proche des savoirs scientifiques.

Nous prenons à notre compte la position de Cédric Linder (1993) en soulignant toute l'importance de la mise en relation des différentes conceptions et de l'identification de leurs limites d'application.

> « I want to argue that science educators' depiction of learning should be extended so that less emphasis is put on efforts to change segments of students' existing repertoires of conceptualizations and more effort on **enhancing students' capabilities to distinguish between conceptualizations in a manner appropriate to some specific context -in other words, being able to appreciate the functional appropriateness of one, or more, of their conceptions in a particular context, making science education into a functional base from which to view the world**. » (Linder, 1993, p. 298), *c'est nous qui soulignons*.

Dans le cas précis de notre recherche, il semble essentiel que les étudiants associent une conception des végétaux avec le type de classification dans laquelle elle prend un sens et qu'ils ne mélangent pas les principes spécifiques de chaque classification. L'absence de

vigilance et le recours à une unique conception des végétaux pour tout contexte sont des facteurs susceptibles de basculer dans une pensée dogmatique. Guy Rumehard nous met en garde contre ce risque de dogmatisation dans l'enseignement, qu'il définit comme « le processus de fermeture du discours » (Rumelhard, 2011, p. 166).

3.2.4. Implications pour l'enseignement universitaire et la formation des enseignants

L'identification des conditions d'applicabilité de chaque conception nécessite un accompagnement. Or, dès la licence, les enseignements sont thématiques et cloisonnés sous formes d'unités d'enseignement. Chaque discipline mobilise une conception donnée des végétaux : la biologie cellulaire, l'évolution, la physiologie, l'écologie… Une question curriculaire se pose donc : comment travailler la construction des disciplines aidant à identifier les objets d'étude et ses méthodes spécifiques tout en articulant ces champs disciplinaires ? Le concept de végétal représente un exemple emblématique pour lequel ces questions curriculaires se posent. Ciblée sur un seul niveau de formation universitaire, notre recherche n'apporte pas de réponse à elle seule. Néanmoins, elle permet de problématiser cette nouvelle question de recherche de l'élaboration des synthèses et des articulations interdisciplinaires au sein de la biologie.

Un travail explicite des problèmes biologiques associés aux classifications offre l'occasion de questionner l'évidence et de remettre en cause un savoir non questionné qui accumule les données mais de manière non problématisée.

Trois espèces ont posé le plus de difficultés aux étudiants : l'orobanche et les deux Eucaryotes unicellulaires. Ils représentent de bons candidats pour travailler la pluralité du concept de végétal en formation et l'articulation entre disciplines.

L'acculturation scientifique est progressive de l'école à l'université. Bien que notre recherche se soit portée uniquement au niveau universitaire, nous souhaitons porter notre attention sur la façon dont le groupe des végétaux est envisagé dans l'enseignement secondaire par la mise en perspective des programmes scolaires avec notre analyse. N'ayant pas conduit de recherche sur les apprentissages en collège-lycée, la réflexion engagée ici en est vraiment à ses prémisses.

3.2.5. Implications pour l'enseignement secondaire

Nous avons montré à quel point le concept de végétal est polysémique et toutes les difficultés d'articulation entre les conceptions fonctionnelles et phylogénétiques qui se posent dans un contexte universitaire. Comment les programmes de SVT en collège et lycée prennent-ils en compte cette polysémie ? Les programmes de SVT ont-ils recours à une unique conception des végétaux ou à une multiplicité et si oui, comment s'articulent-elles ? L'identification des conceptions des végétaux que nous avons réalisée dans le chapitre 4 sert de grille d'analyse des prescriptions auxquelles sont soumis les enseignants.

- **Les différentes conceptions des végétaux dans les programmes**

Le tableau 83 recense des extraits du Bulletin Officiel de l'Education Nationale (BOEN) pour chaque classe : de la sixième à la terminale scientifique. Nous avons analysé les programmes en vigueur actuellement : programmes de collège (2008) et de lycée (2010 ; 2011).

Type de conception	Extraits du BOEN
Conception par opposition : couple végétaux / animaux	•Matière vivante, **animale ou végétale** (Introduction collège) •Peuplement **animal et végétal** (Introduction collège) •Identifier ce qui est **animal, végétal**, minéral ou construit par l'Homme (6e) •Chez les **végétaux comme chez les animaux**, la respiration consiste à absorber du dioxygène et à rejeter du dioxyde de carbone (5e) •La reproduction sexuée **animale comme végétale** comporte l'union d'une cellule reproductrice mâle et d'une cellule reproductrice femelle (4e) •La représentation **d'animaux ou végétaux** actuels ou disparus met en scène un dialogue entre les connaissances scientifiques et les pratiques artistiques (Introduction lycée)
Conception fonctionnelle basée sur le mode de nutrition photosynthétique et le rôle de producteur dans les écosystèmes Et **conception fonctionnelle et cellulaire** (Eucaryotes photosynthétiques avec plastes)	•Les **végétaux chlorophylliens** n'ont besoin pour se nourrir que de matière minérale, à condition de recevoir de la lumière (6e) •La lumière solaire permet, dans les **parties chlorophylliennes des végétaux**, la synthèse de matière organique à partir d'eau, de sels minéraux et de dioxyde de carbone. Ce processus permet, à l'échelle de la planète, **l'entrée de matière minérale et d'énergie** dans la biosphère (2nde) •La **production végétale** : utilisation de la productivité primaire. Un écosystème naturel est constitué d'un biotope et d'une biocénose. Son fonctionnement d'ensemble est permis par la productivité primaire qui, dans les écosystèmes continentaux, repose sur la photosynthèse des plantes vertes (1re S) •**Énergie et cellule vivante** (on se limite aux cellules eucaryotes). La cellule chlorophyllienne des végétaux verts effectue la **photosynthèse** grâce à l'énergie lumineuse. Le chloroplaste est l'organite clé de cette fonction (TS spécialité SVT)
Conception macrocentrée (plantes terrestres ou plantes à fleurs selon les cas)	•Brassage génétique lié à la reproduction sexuée et quelques aspects de mécanismes de l'évolution ; cette partie intègre l'approche du **végétal angiosperme** considéré dans son ensemble (TS) •Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes. L'organisation fonctionnelle **des plantes (angiospermes)** est mise en relation avec les exigences d'une vie fixée en relation avec deux milieux, l'air et le sol (TS)

Conception phylogénétique	•Approche phylogénétique (« étude de la **parenté** ») en 6e [*mais sans exemple indiqué*] et en 2nde : parenté d'organisation (mais exemple des Vertébrés) ; cellule et parenté (« Cette unité structurale et fonctionnelle commune à tous les êtres vivants est un indice de leur parenté ») •Approche **évolutive** mais limitée aux plantes à fleurs (TS) Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution
Délimitation ambiguë Expression « végétaux chlorophylliens » ou « végétaux verts »	3 expressions différentes : "végétaux chlorophylliens" ou "végétaux verts" ou "plantes vertes" •Les **végétaux chlorophylliens** n'ont besoin pour se nourrir que de matière minérale, à condition de recevoir de la lumière (6e) •Un écosystème naturel est constitué d'un biotope et d'une biocénose. Son fonctionnement d'ensemble est permis par la productivité primaire qui, dans les écosystèmes continentaux, repose sur la photosynthèse des **plantes vertes** (1re S) •La cellule chlorophyllienne des **végétaux verts** effectue la photosynthèse grâce à l'énergie lumineuse. Le chloroplaste est l'organite clé de cette fonction (TS spécialité SVT)

Tableau 83 : extraits du bulletin officiel de l'éducation nationale (BOEN) relatifs à différentes conceptions des végétaux dans les programmes de collège (2008) et lycée (2010, 2011), *c'est nous qui soulignons*

Cette analyse montre clairement que les programmes comprennent différentes conceptions du concept de végétal.

Plusieurs références sont interprétées comme mobilisant une conception par opposition distinguant les animaux des végétaux. Deux interprétations de ces programmes restent permises : une vision binaire du monde vivant comportant deux règnes et une conception macrocentrée réduisant les végétaux aux seules plantes terrestres. Une enquête complémentaire permettrait de mieux comprendre la lecture qu'en font les enseignants du secondaire.

Dans un autre contexte, celui de l'étude de la nutrition photosynthétique à différentes échelles et de la production primaire dans les écosystèmes, c'est une conception fonctionnelle qui est présente.

D'autres références aux végétaux sont explicitement macrocentrées réduisant les végétaux aux plantes à fleurs (« végétal angiosperme »). C'est le cas du thème « vie fixée » en terminale.

La connaissance de l'arbre phylogénétique du vivant pour lui-même n'est pas exigible. Mais le concept de parenté se trouve travaillé à plusieurs reprises. En classe de sixième, les élèves réaliseront des classifications par groupes emboîtés mais les exemples ne sont pas imposés à l'enseignant. Une rapide analyse de manuels, présentant une déclinaison possible du programme et constituant une ressource pour les enseignants, nous montre que les végétaux sont présents dans des classifications de nombreux ouvrages de sixième. C'est alors une

conception phylogénétique des végétaux qui est mise en avant, mais selon des choix de groupes très variés suivant les manuels. En classe de seconde, la parenté revient à nouveau dans le programme, mais l'exemple principal travaillé est celui des Vertébrés. La présence de cellules est interprétée comme le fruit d'une origine commune de tous les êtres vivants.

Pour en terminer, nous souhaitons questionner les expressions « végétaux verts » ou « végétaux chlorophylliens », présentes à plusieurs reprises dans les programmes (classes de sixième, première et terminale scientifique spécialité SVT). Elles nous semblent particulièrement ambigües et elles justifient de conduire une recherche complémentaire afin d'identifier le sens que leur donnent les enseignants et les élèves. Les différents sens possibles sont :

- Les végétaux verts sont les Chlorobiontes, un groupe monophylétique. Étant donné le contexte, il nous semble peu probable que cette interprétation soit très présente chez les enseignants, et encore moins chez les élèves qui ne disposent pas de connaissances phylogénétiques

- L'expression « végétaux verts » ou « végétaux chlorophylliens » sous-entend qu'il existe des végétaux non chlorophylliens. Quels seraient alors ces végétaux non chlorophylliens ? Les algues rouges et brunes car n'étant pas vertes (cf. analyse de la difficulté présente chez des étudiants de master) ? Les champignons, nommés par le passé « thallophytes non chlorophylliens » ? Ou les Angiospermes parasites non chlorophylliens (comme l'orobanche) ?

Dans cette expression, si végétal renvoie à un concept fonctionnel, alors l'adjectif « vert » ou « chlorophyllien » devient un pléonasme. Si végétal renvoie à un groupe systématique alors lequel ?

Cette expression nous questionne donc de façon importante sur la manière dont celle-ci sera reçue et interprétée tant par les enseignants que par les élèves.

- **Une apparente superposition des différentes conceptions des végétaux**

Nous souhaitons questionner ici la façon dont le choix de la collection à classer peut conduire à une apparente superposition des différentes conceptions des végétaux, par l'étude d'exemples tirés des classes de sixième et de seconde.

➢ **Exemples en classe de sixième**

Analysons un premier exemple, celui tiré d'une activité de sixième portant sur la classification. Le choix de la collection soumise aux élèves n'est pas anodin. Il comprend

uniquement des organismes d'un groupe monophylétique, les Chlorobiontes (cf. figure 101). Cet exemple est inspiré de la collection proposée dans l'ouvrage dirigé par G. Lecointre (2008, p. 316).

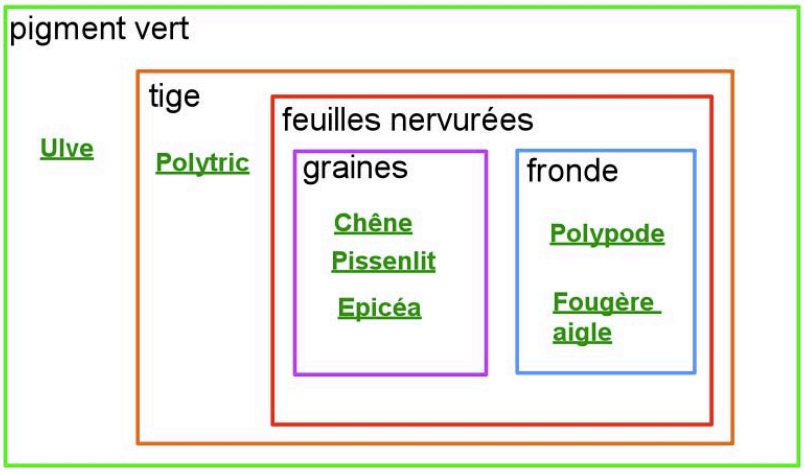


Figure 101 : exemple de groupes emboîtés réalisés en classe de sixième[187]

Un extrait d'un manuel de sixième est représenté en figure 102 et restreint les végétaux aux « végétaux verts », correspondant probablement pour les auteurs aux Chlorobiontes[188] traduisant une conception phylogénétique réduite des végétaux.

[187] Source : http://blog.ac-versailles.fr/svt/index.php/post/23/10/2012/Correction-de-l-exercice-de-classification-des-végétaux-6ème, consulté le 29 mars 2016.

[188] Cependant le terme « Algues (thallophytes) » sans restriction aux seules algues vertes peut nous faire douter quant à l'équivalence entre l'expression « végétaux verts » et le groupe monophylétique des Chlorobiontes.

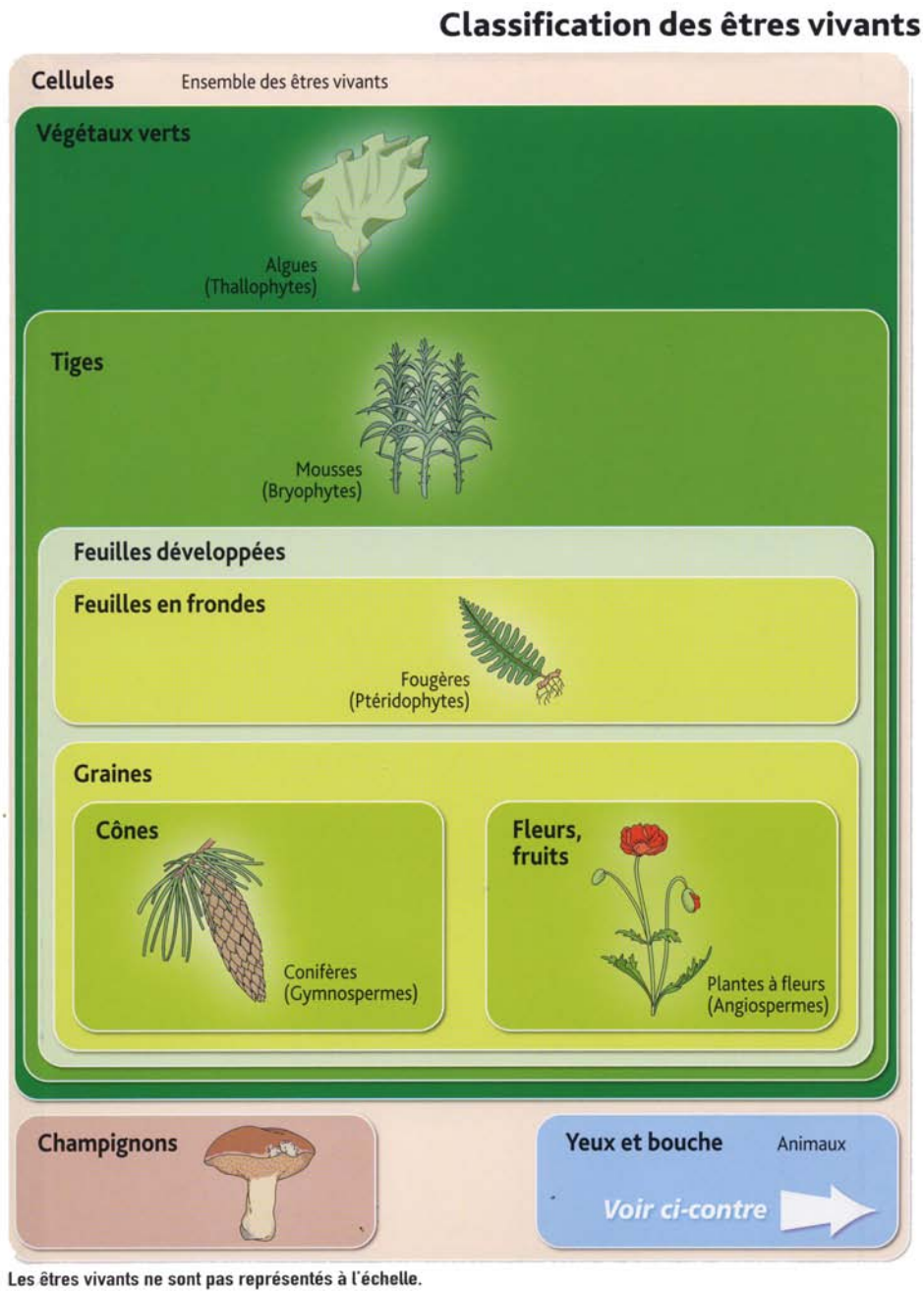


Figure 102 : classification présentée sous forme de groupes emboîtés (manuel SVT de 6e, édition Magnard, 2013, 2e de couverture)

- **Exemples en classe de seconde**

En seconde, l'item du programme « cellule et parenté »[189] donne lieu à une interprétation phylogénétique par certains manuels représentant le groupe des végétaux dans un arbre du vivant. Nous illustrons cet exemple dans le cas de la figure 103.

[189] Extrait du programme : « Cette unité structurale et fonctionnelle commune à tous les êtres vivants est un indice de leur parenté »

b. La cellule, un indice de parenté entre les êtres vivants

- Tous les êtres vivants, sans exception, sont constitués de cellules. Cet attribut commun témoigne de leur parenté. Une étude plus approfondie des cellules permet de préciser ces relations de parenté :

– les animaux, les plantes, les champignons, possèdent des cellules compartimentées, contenant des organites spécialisés comme le noyau, les mitochondries etc. (ce sont des **eucaryotes**) ;

– seules les plantes possèdent des chloroplastes ;

– les bactéries sont des cellules très petites et dont l'organisation est très simple, sans compartiments et sans organites (de telles cellules sont qualifiées de **procaryotes**).

- À partir de ces caractères, une **classification évolutive** du monde vivant a été construite. Les eucaryotes regroupent tous les êtres vivants dont les cellules possèdent un noyau et des organites. Au sein des eucaryotes, les membres de la lignée verte sont les seuls à posséder des chloroplastes dans leurs cellules.

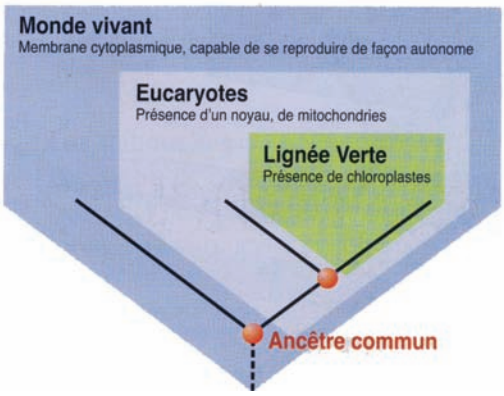


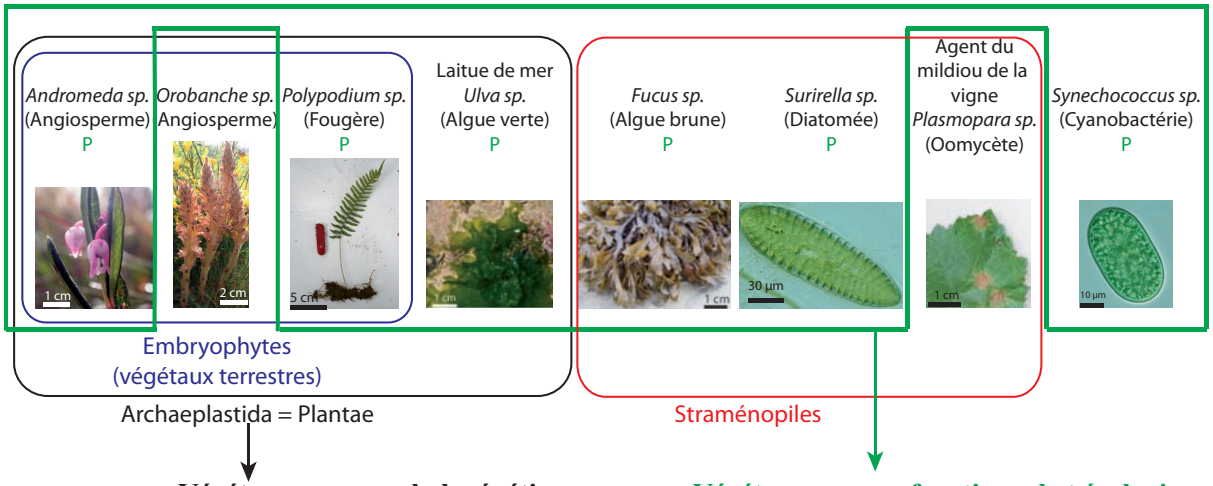
Figure 103 : exemple extrait d'un manuel de SVT de seconde (Bordas édition 2010, p. 43), *c'est nous qui encadrons*

Dans cet extrait, le terme « végétaux » n'apparaît pas mais deux expressions sont présentées comme équivalentes : le terme de « plantes » et l'expression « lignée verte », qui sont présentées comme les seuls organismes à posséder des chloroplastes dans leurs cellules, mobilisant alors une conception fonctionnelle et cellulaire.

- **Analyse des exemples présentés**

Ainsi le choix de la collection limitée à des organismes de la lignée verte ou des Chlorobiontes conduit à superposer les deux conceptions fonctionnelle et phylogénétique. La figure 104 illustre de quelle façon la réduction de la biodiversité à certaines espèces conduit à masquer le problème de l'articulation de deux conceptions différentes des végétaux en lien avec deux types de classification : fonctionnelle et phylogénétique.

A. Les différentes conceptions des végétaux en considérant une biodiversité importante



Végétaux au sens phylogénétique
"un groupe monophylétique dans la phylogénie actuelle
avec un plaste à deux membranes (Archaeplastida)
ou possédant de la chlorophylle A et B (Chlorobiontes)
ou un embryon nourri par l'organisme maternel (Embryophytes)"

Végétaux au sens fonctionnel et écologique
"Producteurs primaires réalisant
la photosynthèse oxygénique"

P: photosynthèse

B. Superposition apparente des conceptions phylogénétique et fonctionnelle des végétaux en considérant une biodiversité réduite

Végétaux (avec superposition des différentes conceptions)
"organismes possédant des cellules végétales (cellules eucaryotes avec des plastes et une paroi)
réalisant la photosynthèse oxygénique et constituant des producteurs primaires
formant un groupe monophylétique par réduction de la collection"

Figure 104 : apparente superposition des conceptions phylogénétiques et fonctionnelle des végétaux en considérant une biodiversité limitée

Le choix de la collection à classer constitue une variable didactique essentielle. Prendre l'option d'une collection réduite aux seules plantes terrestres ou bien élargie aux Chlorobiontes ou encore aux Archaeplastida, permet de travailler sur un groupe dont la monophylie est avérée dans la phylogénie actuelle. Mais elle n'offre pas la possibilité de questionner la polysémie du concept de végétal par une apparente superposition des conceptions fonctionnelle et phylogénétique. Si l'absence d'introduction de ce problème au

collège pourrait paraître légitime, elle questionne au niveau du lycée dans lequel les élèves disposent d'outils pour réfléchir à ce problème.

Même au sein d'une collection limitée à un groupe valide comme les Embryophytes, l'introduction d'une plante, telle que l'orobanche, favorise l'introduction d'un raisonnement évolutif, et d'une réflexion sur la temporalité, spécifique de la classification phylogénétique. Faire porter l'attention des élèves sur des exemples de pertes secondaires peut constituer une condition pour engager une discussion sur l'absence de direction à l'évolution, qui n'a pas de sens, et, par voie de conséquence, travailler sur le mythe du progrès.

Conclusion

1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS MAJEURS 481

2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE 483

2.1. Étude des pratiques de formation universitaire et de leur impact 483
2.1.1. Étude curriculaire concernant les végétaux et les autres groupes biologiques polysémiques 483
2.1.2. Étude des articulations interdisciplinaires en biologie 484
2.1.3. Les activités de définition, de classification dans l'enseignement supérieur 484

2.2. Étude au niveau de l'enseignement secondaire 484

2.3. Étude des relations entre histoire des sciences et enseignement 485

2.4. Étude utilisant les cartes conceptuelles 485
2.4.1. Étude comparative des stratégies de construction des cartes conceptuelles et de leurs conséquences 485
2.4.2. Cartes conceptuelles et problématisation 485

1. Synthèse des résultats majeurs

Les principaux résultats de cette recherche ont été discutés lors du chapitre précédent. Nous proposons de les récapituler en figure 105. Celle-ci présente de façon synthétique les apports de chacune des trois enquêtes et leur relation dialectique. Nous avons mis l'accent sur les résultats relatifs à la recherche de compréhension du raisonnement classificatoire des étudiants dans différentes situations de classification et de leurs conceptions relatives au concept de végétal, d'une part, et la compréhension de l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux à travers l'histoire de la systématique, d'autre part. Cette figure souligne également les apports de l'utilisation didactique d'articles scientifiques et de l'histoire des sciences sur les plans conceptuel et épistémologique.

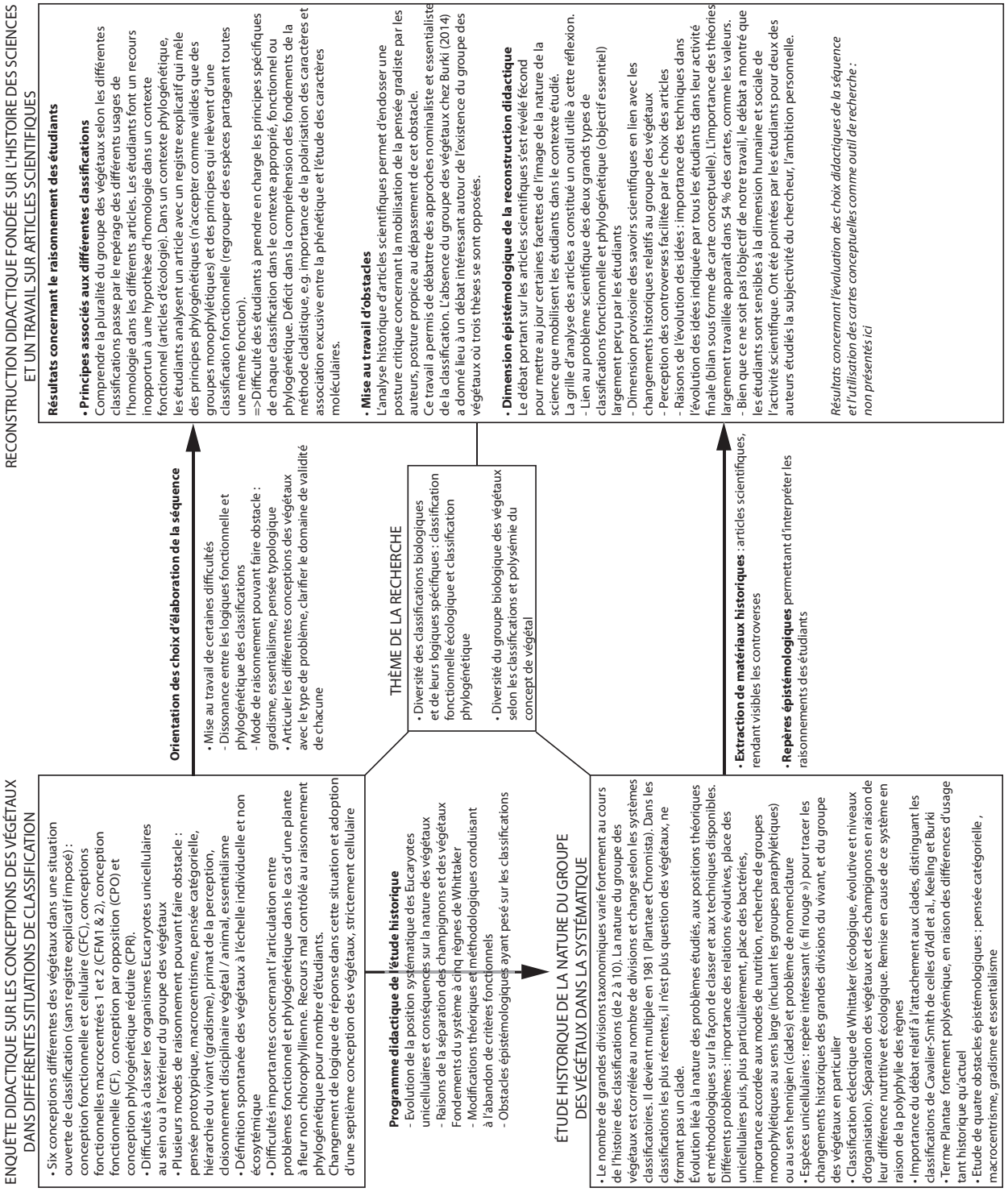


Figure 105 : synthèse des principaux résultats de la recherche

Outre cette recherche de compréhension qui constitue l'objectif premier de la thèse, nous avons exploré une question de nature méthodologique portant sur l'utilisation des cartes conceptuelles, ce qui nous a permis d'étudier le raisonnement des étudiants et, en particulier, la construction de problèmes. Une méthodologie originale fut élaborée croisant des analyses quantitatives et qualitatives basées sur des cartes conceptuelles. Cette recherche montre tout le

potentiel et les limites de l'étude de l'élaboration de la carte conceptuelle, qui apporte des informations nouvelles et complémentaires de celles fournies par l'étude de la production.

Certains résultats, ainsi que les limites de notre étude qui ont été discutées dans le chapitre 5, nous permettent d'ouvrir des perspectives de recherche, perspectives dont nous vous proposons, ci-après, la récapitulation.

2. Perspectives de recherche

Quatre grandes perspectives se dégagent de cette étude. Une à une, nous présenterons les pistes concernant la formation universitaire, l'enseignement secondaire, les relations entre histoire et enseignement des sciences et, pour terminer, l'utilisation des cartes conceptuelles.

2.1. Étude des pratiques de formation universitaire et de leur impact

2.1.1. Étude curriculaire concernant les végétaux et les autres groupes biologiques polysémiques

Vingt-six universités participèrent à notre enquête nationale (cf. chapitre 2). Parmi elles, cinq universités ont fourni plus de vingt réponses chacune, soit 131 étudiants sur un corpus de 333 étudiants. Cherchant à connaître si l'origine universitaire pourrait peser sur les conceptions des étudiants, nous avons entrepris la construction d'une étude statistique. Un test exact de Fisher montre que les différentes conceptions ne sont pas représentées en proportions équivalentes pour chacune des cinq universités[190]. Ce résultat suggère l'impact possible de la formation universitaire sur le type de conceptions avancé par les étudiants dans une situation ouverte de classification. Une étude curriculaire comparative permettrait de caractériser les choix de formation des enseignants concernant les classifications. Elle offrirait également le moyen de comprendre comment est travaillée la polysémie des groupes biologiques (e.g. végétaux, animaux, champignons, algues).

En France, la formation des enseignants est partiellement contrainte par le programme du concours de recrutement (CAPES SVT). Il serait intéressant de confronter la formation universitaire française avec celle d'un pays, comme le Canada, où le curriculum ne possède pas cette contrainte. Une étude des pratiques déclarées, par le biais d'entretiens et d'un questionnaire, et des pratiques effectives de formation pourrait éclairer cette question.

[190] La p-value est de 0,016 et donc inférieure au seuil de 0,05 (soit 5 %) : elle permet de rejeter l'hypothèse nulle (H_0) d'homogénéité des réponses entre les cinq universités, au risque de se tromper à 5 %.

2.1.2. Étude des articulations interdisciplinaires en biologie

Une implication de notre recherche sur l'enseignement, esquissée lors du précédent chapitre, portait sur les nécessaires articulations entre les différents registres fonctionnel et phylogénétique. Une perspective de recherche consiste en une analyse de la façon dont une équipe pédagogique universitaire pense et met en place les articulations entre les différents champs de la biologie : biologie cellulaire, écologie, évolution, etc. Nous pourrions ainsi étudier comment s'accompagne le travail de synthèse que doivent réaliser les étudiants pour mettre en lien des connaissances élaborées dans des unités d'enseignement thématiques cloisonnées.

2.1.3. Les activités de définition, de classification dans l'enseignement supérieur

Nous avons montré les difficultés des étudiants pour distinguer et clarifier la relation complexe entre les activités de définition et de classification. Au vue de l'importance de ces activités en biologie, une recherche complémentaire doit être envisagée. En fonction des problèmes et du type de discipline biologique, cette recherche permettrait de mieux comprendre le recours à ces deux activités dans l'enseignement biologique.

2.2. Étude au niveau de l'enseignement secondaire

Les classifications biologiques sont enseignées au collège et au lycée. Lors du chapitre précédent, nous avons analysé les différentes conceptions des végétaux présentes dans le programme officiel. Il semble intéressant de prolonger notre étude des conceptions chez les élèves de différentes classes de collège et lycée de manière à analyser l'impact des enseignements sur la façon dont ces apprenants construisent leurs représentations des différents groupes biologiques ainsi que les principes qui fondent les classifications du vivant.

Notre étude a permis de dégager six types d'obstacles susceptibles d'entraver un raisonnement classificatoire chez des étudiants de niveau master. Ils ont été modélisés sous la forme d'un hexagone qui reste à mettre à l'épreuve. Une recherche au niveau secondaire permettrait de prolonger l'étude des obstacles et leur éventuelle mise en jeu au niveau concerné.

Par ailleurs, nous avons soulevé le fait que le choix d'une collection réduite pouvait conduire à masquer le problème de la polysémie du groupe des végétaux. Une expérimentation didactique au lycée (par exemple en classe de seconde) devrait permettre de questionner les conditions de possibilités d'une telle réflexion didactique d'articulation de problèmes fonctionnel et phylogénétique.

2.3. Étude des relations entre histoire des sciences et enseignement

La dialectique entre histoire des sciences et enseignement a constitué une part importante de notre recherche. Une perspective de recherche consiste à définir des critères d'historicité visant à penser un enseignement d'histoire des sciences, lequel doit respecter un certain nombre de pratiques de références des historiens. L'importance de la contextualisation historique et le changement de posture, refusant de juger l'histoire à l'aune des connaissances actuelles (posture nommée « whig history ») avaient été proposées. Notre thèse en appelle donc à de nouvelles expérimentations didactiques d'un enseignement d'histoire des sciences pour contribuer au développement d'une didactique de l'histoire des sciences.

Nous aimerions étudier la fonction d'inducteur de problématisation des items de la grille d'analyse des textes fournie aux étudiants.

2.4. Étude utilisant les cartes conceptuelles

2.4.1. Étude comparative des stratégies de construction des cartes conceptuelles et de leurs conséquences

La recherche portant sur l'élaboration de la carte conceptuelle était une étude de cas. Elle concernait une seule carte sur treize. L'extension de cette étude aux douze autres groupes permettrait de dégager des éléments communs, i.e. des régularités à petite échelle, mais aussi des différences d'approche. Nous aimerions comprendre l'effet de la stratégie d'élaboration de la carte sur la nature de l'activité des étudiants. Certains binômes listèrent un grand nombre d'idées (« brainstorming ») qu'ils cherchèrent à mettre en relation dans un second temps, alors que d'autres groupes définirent d'abord la structure générale de la carte qu'ils précisèrent ensuite. Ces deux stratégies eurent-elles un impact sur le raisonnement mis en œuvre et la production réalisée ?

2.4.2. Cartes conceptuelles et problématisation

L'étude de l'élaboration d'une carte conceptuelle fournit des indicateurs partiels permettant la formulation d'hypothèses sur les problèmes construits par les étudiants. Mais l'existence de nombreux implicites sur certaines branches du réseau conceptuel limite l'analyse du processus de problématisation. Nous proposons de prolonger cette recherche et, ainsi, contribuer au développement du cadre théorique de l'apprentissage par problématisation. Nous envisageons une nouvelle expérimentation didactique mettant en œuvre un débat portant sur la comparaison des différentes cartes conceptuelles réalisées par des groupes d'étudiants

afin d'engager plus avant les étudiants dans un travail autour des raisons qui fondent les relations conceptuelles envisagées dans leur carte.

Bibliographie

Abd-El-Khalick, F. & Lederman, N. G. (2000a). Improving science teachers' conceptions of nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, *22*(7), 665-701.

Abd-El-Khalick, F. & Lederman, N. G. (2000b). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, *37*(10), 1057-1095.

Adanson, M. (1763). *Familles des plantes.* Paris: Vincent.

Adl, S. M., Simpson, A. G., Farmer, M. A., Andersen, R. A., Anderson, O. R., Barta, J. R., *et al.* (2005). The new higher level classification of Eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *J Eukaryot Microbiol*, *52*(5), 399-451.

Adl, S. M., Simpson, A. G., Lane, C. E., Lukeš, J., Bass, D., Bowser, S. S., *et al.* (2012). The revised classification of Eukaryotes. *J Eukaryot Microbiol*, *59*(5), 429-93.

Allchin, D. (1999). Values in science: An educational perspective. *Science & Education*, *8*, 1-12.

Amundsen, C., Weston, C., & McAlpine, L. (2008). Concept mapping to support university academics' analysis of course content. *Studies in Higher Education*, *33*(6), 633-652.

Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *9*(3), 281-308.

Artigue, M. & Robinet, J. (1982). Conceptions du cercle chez des enfants de l'école élémentaire. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *3*(1), 5-64.

Astolfi, J. -P. (2011). *L'erreur, un outil pour enseigner.* Paris: ESF éditeur.

Astolfi, J. -P., Giordan, A., Gohau, G., Host, V., Martinand, J. -L., Rumelhard, G., *et al.* (1978). *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* Paris: PUF.

Astolfi, J. P. (1993). Trois paradigmes pour les recherches en didactique. *Revue Française De Pédagogie*, *103*(1), 5-18.

Astolfi, J. P. & *et al.* (1985). Le statut des représentations en didactique des sciences. Dans *Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales* (p. 9-18). Paris : INRP.

Astolfi, J. P. & Peterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, *16*, 103-141.

Astolfi, J. P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y., & Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies.* Paris-Bruxelles: De Boeck Université.

Atran, S. (1998). Folk biology and the anthropology of science: Cognitive universals and cultural particulars. *Behavioral and Brain Sciences*, *21*(04), 547-569.

Bachelard, G. (1940). *La philosophie du non.* Paris: PUF.

Bachelard, G. (1949). *Le rationalisme appliqué.* Paris: PUF.

Bachelard, G. (1970). L'idéalisme discursif. Dans *Études*. Paris: Vrin.

Bachelard, G. (1993). *La formation de l'esprit scientifique : Contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Paris: J. Vrin. (Ouvrage original publié en 1938)

Bächtold, M. (2012). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, (38), 6-39.

Bakhtine, M. M. (1984). *Esthétique de la création verbale*. Paris: Gallimard.

Barman, C. R., Stein, M., McNair, S., & Barman, N. S. (2006). Students' ideas about plants & plant growth. *The American Biology Teacher*, *68*(2), 73-79.

Barriel, V. (2009). Caractère. Dans T. Heams, P. Huneman, G. Lecointre & M. Silberstein (dir.)*, Les mondes darwiniens* (p. 205-239). Paris: Editions Matériologiques.

Baum, D. A., Smith, S. D., & Donovan, S. S. (2005). Evolution. The tree-thinking challenge. *Science*, *310*(5750), 979-80.

Bell, B. F. (1981). What is a plant: Some children's ideas. *New Zealand Science Teacher*, *31*, 10-14.

Bianchi, L. (2000). So what do you think a plant is? *Primary Science Review*, *61*, 15-17.

Blagkwelder, R. E. & Boyden, A. (1952). The nature of systematics part III.-Perspectives in systematics. *Systematic Biology*, *1*(1), 26-33.

Bory de Saint Vincent, J. -B. (1824). Psychodiaire. Règne. Dans *Encyclopédie méthodique* (p. 657-663). Paris: Agasse.

Bosdeveix, R. (2011). *Le concept de végétal : Analyse didactique chez des étudiants de master 2 se destinant à l'enseignement des SVT*. Mémoire de master 2 de didactique des disciplines. Université Paris Diderot - Paris 7.

Bosdeveix, R. & Lhoste, Y. (2014). Problématisation relative à la classification et l'évolution des végétaux chez des étudiants de master 2 se destinant à l'enseignement des SVT. *Les Cahiers D'Esquisse*, *5*, 21-30.

Boyer, C. (2000). Conceptualisation et actions didactiques à propos de la reproduction végétale. *Aster*, *31*, 149-171.

Brown, M. H. & Schwartz, R. S. (2009). Connecting photosynthesis and cellular respiration: Preservice teachers' conceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, *46*(7), 791-812.

Burki, F. (2014). The eukaryotic tree of life from a global phylogenomic perspective. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, *6*(5), 1-17.

Burki, F., Shalchian-Tabrizi, K., Minge, M., Skjaeveland, A., Nikolaev, S. I., Jakobsen, K. S., *et al.* (2007). Phylogenomics reshuffles the eukaryotic supergroups. *PloS One*, *2*(8), e790.

Buty, C. & Cornuéjols, A. (2002). Evolution des connaissances chez l'apprenant. Dans A. Tiberghien (dir.), *Des connaissances naïves au savoir scientifique* (p. 31-49) [Synthèse commandée par le programme "Ecole et sciences cognitives"]. Lyon. Récupéré du site http://edutice.archives-ouvertes.fr/docs/00/00/17/89/PDF/Tiberghien.pdf

Cañal, P. (1999). Photosynthesis and ´inverse respiration´ in plants: An inevitable misconception? *International Journal of Science Education*, *21*(4), 363-372.

Canguilhem, G. (1979). Préface. Dans F. Delaporte*, Le second règne de la nature : Essai sur les questions de la végétalité au XVIII^e siècle.* Paris: Flammarion.

Cavalier-Smith, T. (1981). Eukaryote kingdoms: Seven or nine? *BioSystems*, *14*(3-4), 461-481.

Cavalier-Smith, T. (1993). Kingdom Protozoa and its 18 phyla. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *57*(4), 953-994.

Cavalier-Smith, T. (1998). A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, *73*(3), 203-266.

Cavalier-Smith, T. (2004). Only six kingdoms of life. *Proc Biol Sci*, *271*(1545), 1251-62.

Cavalier-Smith, T. (2010). Kingdoms Protozoa and Chromista and the eozoan root of the eukaryotic tree. *Biol Lett*, *6*(3), 342-5.

Chevron, M-P. (2014). A metacognitive tool: Theoretical and operational analysis of skills exercised in structured concept maps. *Perspectives in Science*, *2*(1), 46-54.

Chorlay, R. & de Hosson, C. (2016). History of science, epistemology and mathematics education research. Dans B.R. Hodgson, A. Kuzniak, J-B. Lagrange (dir.)*, The didactics of mathematics: Approaches and issues. A homage to Michèle Artigue.* New York: Springer.

Clement, J. (1983). A conceptual model discussed by galileo and used intuitively by physics students. Dans D. Gentner & A. L. Stevens (dir.), *Mental models* (p. 325-340). Hillsdale, N.J.: Routledge

Clément, P. (2007). Introducing the cell concept with both animal and plant cells: A historical and didactic approach. *Science & Education*, *16*(3), 423-440.

Clément, P. (2014). Recherches en didactique de la biologie sur les conceptions et obstacles. Dialogue avec Jean-Pierre Astolfi. *Recherches En Didactique Des Sciences Et Des Technologies*, (9), 129-154.

Copeland, H. F. (1938). The kingdoms of organisms. *The Quarterly Review of Biology*, *13*(4), 383-420.

Copeland, H. F. (1947). Progress report on basic classification. *The American Naturalist*, *81*(800), 340-361.

Cordier, F. (1986). La catégorisation naturelle : Niveau de base et typicalité. *Revue Française De Pédagogie*, *77*(1), 61-70.

Crépin-Obert, P. (2010). Idées et raisons sur les coquilles fossiles : Étude épistémologique comparée entre une situation de débat à l'école primaire et une controverse historique. *Recherches en Didactiques des Sciences et des Technologies*, *1*, 93-120.

Crépin-Obert, P. (2011). Raison ou obstacle entre histoire de la paléontologie en classe de collège : Analogie ou analogisme. *Recherches en Didactiques des Sciences et des Technologies*, *3*, 21-54.

Crombie, A. C. (1994). *Styles of scientific thinking in the european tradition: The history of argument and explanation especially in the mathematical and biomedical sciences and arts.* London: Duckworth.

Darwin, C. (1859). *On the origins of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life.* London: Murray.

Dayrat, B. (2003). The roots of phylogeny: How did haeckel build his trees? *Systematic Biology*, *52*(4), 515-527.

de Hosson, C. (2011). *L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique.* Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches. Université Paris Diderot. Récupéré du site http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=lm3j3669r1p2fp8n3s4qi2q9d1&view_this_doc=tel-00655594&version=1.

de Hosson, C. & Décamp, N. (2013). Using ancient chinese and greek astronomical data: A training sequence in elementary astronomy for pre-service primary school teachers. *Science & Education*, 1-19.

de Hosson, C. & Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences. *Recherches en Didactiques des Sciences et des Technologies*, *3*, 9-20.

De Lievre, B., Decamps, S., Dujardin, C., & Depover, C. (2010). Perception of the usefulness and usability of Cmaptools in a university-level collaborative remote learning activity. Dans J. Sánchez, A.J.Cañas, J.D.Novak, (dir.), *Concept maps: Making learning meaningful proc. Of fourth Int. Conference on concept mapping.* Viña del Mar, Chile. Récupéré du site http://cmc.ihmc.us/cmc/CMCProceedings.html

de Ricqlès, A. (1996). *Chaire de biologie historique et évolutionnisme, collège de france, leçon inaugurale.* Paris: Collège de France.

de Ricqlès, A. & Padian, K. (2009). Quelques apports à la théorie de l'évolution, de la « synthèse orthodoxe » à la « super synthèse évo-dévo » 1970–2009 : Un point de vue. *Comptes Rendus Palevol*, *8*(2-3), 341-364.

de Tournefort, J. P. (1694). *Eléments de botanique ou méthode pour connaître les plantes.* Paris: Impr. royale.

Debru, C. (2009). *Penser l'inconnu ? La recherche en biologie.* Paris: Hermann.

Décamp, N. & de Hosson, C. (2010). Implementing eratosthenes' discovery in the classroom: Educational difficulties needing attention. *Science & Education*, 1-10.

Deleporte, P. (2014). Taxons, classifications : De la théorie au cahier des charges. Dans P. Deleporte et G. Lecointre (dir.) *Biosystema 24 : philosophie de la systématique* (p. 67-83). Paris: Editions Matériologiques. (Ouvrage original publié en 2005).

Delsuc, F., Brinkmann, H., & Philippe, H. (2005). Phylogenomics and the reconstruction of the tree of life. *Nature Reviews Genetics*, *6*(5), 361-375.

Derbentseva, N., Safayeni, F., & Cañas, A. (2007). Concept maps: Experiments on dynamic thinking. *Journal of Research in Science Teaching*, *44*(3), 448-465.

Di Sessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "Coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 35-60). New York: Routledge.

Doolittle, W. F. (1999). Phylogenetic classification and the universal tree. *Science*, *284*(5423), 2124-2128.

Dorier, J. L. (2006). Recherches en histoire et en didactique des mathématiques sur l'algèbre linéaire – perspective théorique sur leurs interactions. *Cahiers Du Laboratoire Leibniz*, *12*.

Douady, R. (1986). Jeux de cadres et dialectique outil-objet. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *7*(2), 5-31.

Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, *11*(5), 481-490.

Duris, P. (2008). Les débats autour de la taxinomie linnéenne en France au XVIII^{e} siècle. Dans D. Prat, A. Raynal-Roques & A. Roguenant (dir.), *Peut-on classer le vivant? Linné et la systématique aujourd'hui.* (p. 31-38). Paris: Belin.

Ellen, R. F. & Reason, D. (1979). *Classifications in their social context.* New York: Academic Press.

Fabre, M., & Musquer, A. (2009). Comment aider l'élève à problématiser ? Les inducteurs de problématisation. *Les Sciences De L'éducation - Pour L'Ère Nouvelle*, *42*(3), 111-128

Fabre, M. (1995). *Bachelard éducateur.* Paris: Presses universitaires de France.

Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire.* Paris: Presses universitaires de France.

Fabre, M. (2009). Qu'est-ce que problématiser ? Genèses d'un paradigme. *Recherches En Education*, *6*(22-32).

Fabre, M. (2010). Du bon usage des controverses. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, *1*, 153-170.

Fabre, M. & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, *24*, 37-57.

Fisler, M. & Lecointre, G. (2013). Categorizing ideas about trees: A tree of trees. *PloS One*, *8*(8), e68814.

Fitch, W. M. & Margoliash, E. (1967). Construction of phylogenetic trees. *Science*, *155*(3760), 279-284.

Foth, B. J. & McFadden, G. I. (2003). The apicoplast: A plastid in plasmodium falciparum and other apicomplexan parasites. *International Review of Cytology*, *224*, 57-110.

Gatt, S., Tunnicliffe, S. D., Borg, K., & Lautier, K. (2007). Young maltese children's ideas about plants. *Journal of Biological Education*, *41*(3), 117-122.

Gayon, J. (2001). Classification. Dans N. Witkowski (dir), *Dictionnaire culturel des sciences* (p. 101-102). Paris: Éditions du Seuil.

Gayon, J. (2004). De la biologie comme science historique. *Sens Public.*

Girault, Y. & Lhoste, Y. (2010). Opinions et savoirs: Positionnements épistémologiques et questions didactiques. *Recherches En Didactiques Des Sciences Et Des Technologies*, (1), 29-66.

Gohau, G. (1995). Traquer les obstacles épistémologiques à travers les lapsus d'élèves et d'écrivains. *Aster*, *20*, 21-41.

Gould, S. J. (1996, November 13). Planet of the bacteria. *The Washington Post Horizon.* Récupéré du site http://www.stephenjaygould.org/library/gould_bacteria.html

Gould, S. J. (1997). *L'éventail du vivant : Le mythe du progrès.* Paris: Seuil.

Granel, F. (1974). Le cumul de chaires professorales dans les facultés de l'université de Montpellier au cours du XIX^{e} siècle. *Histoire Des Sciences Médicales*, *8*(4), 828-838.

Gregory, T. R. (2008). Understanding evolutionary trees. *Evolution: Education and Outreach*, *1*(2), 121-137.

Grize, J. -B. (1982). *De la logique à l'argumentation.* Genève: Librairie Droz.

Grize, J. -B. (1996). *Logique naturelle et communication.* Paris: PUF.

Guedj, M., Laubé, S., & Savaton, P. (2007). Éléments de problématiques et de méthodologie pour une didactique de l'épistémologie et de l'histoire des sciences et des techniques (EHST). *Actes du colloque AREF Actualité de la recherche en éducation et en formation*, Strasbourg.

Hacking, I. (1992). Style for historians and philosophers. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, *23*(1), 1-20.

Haeckel, E. (1866). *Generelle morphologie der organismen: Allgemeine grundzüge der organische formen-wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte descendenz-theorie* (Vol. 1 & 2). Berlin: Reimer.

Haeckel, E. (1869). Monograph of monera. *Quarterly Journal of Microscopica*, *2-9*, 27-42, 113-134, 219-232, 327-342.

Haeckel, E. (1877). *Anthropogénie, ou histoire de l'évolution humaine : Leçons familières sur les principes de l'embryologie et de la phylogénie humaines (traduit de l'allemand sur la 2^{e} édition par le Dr Ch. Letourneau).* Paris: C. Reinwald.

Haeckel, E. (1880). *The history of creation or the development of the earth and its inhabitants by the action of natural causes* (Vol. 2). New York: Appleton. Récupéré du site http://www.gutenberg.org/files/40473/40473-h/40473-h.htm

Haeckel, E. (1904). *The wonders of life. A popular study of biological philosophy.* New York & London: Harper & brothers.

Hagen, J. B. (1996). Robert Whittaker and the classification of kingdoms. Dans *J. B. Hagen, D. Allchin, & F. Singer. Doing biology* (p. 11-22). New York: Harper Collins.

Hagen, J. B. (2010). History of plant ecology. Dans *Encyclopedia of life sciences (ELS). John Wiley & sons, ltd: Chichester.* Wiley Online Library.

Hagen, J. B. (2012). Five kingdoms, more or less: Robert Whittaker and the broad classification of organisms. *BioScience*, *62*(1), 67-74.

Halbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant.* Paris: Delachaux et Niestlé.

Halverson, K., Pires, C. J., & Abell, S. K. (2011). Exploring the complexity of tree thinking expertise in an undergraduate systematics course. *Science Education*, *95*(5), 794-823.

Henderson, J. B., MacPherson, A., Osborne, J., & Wild, A. (2015). Beyond construction: Five arguments for the role and value of critique in learning science. *International Journal of Science Education*, *37*(10), 1668-1697.

Hennig, W. (1950). *Grundzuge einer theorie der phylogenetischen systematik.* Berlin: Deutscher Zentralverlag.

Hennig, W. (1965). Phylogenetic systematics. *Annual Review of Entomology*, *10*(1), 97-116.

Hennig, W. (1966). *Phylogenetic systematics.* Urbana: University of Illinois Press.

Hewson, P. W. & Hewson, M. G. (1988). An appropriate conception of teaching science: A view from studies of science learning. *Science Education*, *72*(5), 597-614.

Hill, A. W. (1915). The history and functions of botanic gardens. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *2*, 185-240.

Hogg, J. (1860). On the distinctions of a plant and an animal, and on a fourth kingdom of nature. *Edinburgh New Phil J, NS*, *12*, 216-225.

Horton, P. B., McConney, A. A., Gallo, M., Woods, A. L., Senn, G. J., & Hamelin, D. (1993). An investigation of the effectiveness of concept mapping as an instructional tool. *Science Education*, *77*(1), 95-111.

Höttecke, D., Henke, A., & Riess, F. (2012). Implementing history and philosophy in science teaching: Strategies, methods, results and experiences from the european HIPST project. *Science & Education*, *21*(9), 1233-1261.

Hull, D. L. (1965). The effect of essentialism on taxonomy--two thousand years of stasis (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, *15*(60), 314-326.

Hull, D. L. (1986). Les fondements épistémologiques de la classification biologique. Dans P. Tassy (dir.), *L'ordre et la diversité du vivant* (p. 163-203). Paris: Fayard.

Huxley, J. (1940). *The new systematics.* Oxford: Oxford University Press.

Huxley, J. (1942). *The modern synthesis.* London: Allen and Unwin.

Irwin, A. R. (2000). Historical case studies: Teaching the nature of science in context. *Science Education*, *84*(1), 5-26.

Irzik, G. & Nola, R. (2011). A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Sci & Educ*, *20*(7-8), 591-607.

Irzik, G. & Nola, R. (2014). New directions for nature of science research. Dans M. R. Matthews (dir.)*, International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (p. 999-1021). Dortrecht: Springer.

Jardine, N. (2003). Whigs and stories: Herbert butterfield and the historiography of science. *History of Science*, *41*, 125-140.

Jaubert, M. (2007). *Du contexte, à la communauté discursive et aux gestes*. Note de synthèse d'habilitation à diriger des recherches. Université de Bordeaux 2.

Jiménez-Aleixandre, M. P. (2002). Knowledge producers or knowledge consumers? Argumentation and decision making about environmental management. *International Journal of Science Education*, *24*(11), 1171-1190.

Jiménez-Aleixandre, M. P. & Erduran, S. (2008). Argumentation in science education: An overview. Dans Erduran S. & Jiménez-Aleixandre M.P. (dir.), *Argumentation in science education. Perspectives from classroom-based research* (p. 3-27). Dordrecht: Springer.

Keeling, P. J. (2004). Diversity and evolutionary history of plastids and their hosts. *American Journal of Botany*, *91*(10), 1481-1493.

Keeling, P. J. (2010). The endosymbiotic origin, diversification and fate of plastids. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *365*(1541), 729-48.

Keeling, P. J. (2013). The number, speed, and impact of plastid endosymbioses in eukaryotic evolution. *Annu Rev Plant Biol*, *64*, 583-607.

Keeling, P. J., Burger, G., Durnford, D. G., Lang, B. F., Lee, R. W., Pearlman, R. E., *et al.* (2005). The tree of eukaryotes. *Trends Ecol Evol*, *20*(12), 670-6.

Khantine-Langlois, F. & Biau, M. (2009). Évolution des connaissances des élèves sur les concepts d'acides et de bases en relation avec les programmes. *Bulletin De L'Union Des Physiciens*, *103*(917), 859-874.

Kinchin, I. M. (2001). If concept mapping is so helpful to learning biology, why aren't we all doing it? *International Journal of Science Education*, *23*(12), 1257-1269.

Kinchin, I. M. (2011). Visualising knowledge structures in biology: Discipline, curriculum and student understanding. *Journal of Biological Education*, *45*(4), 183-189.

Kinchin, I. M., Hay, D. B., & Adams, A. (2000). How a qualitative approach to concept map analysis can be used to aid learning by illustrating patterns of conceptual development. *Educational Research*, *42*(1), 43-57.

Kleiber, G. (1990). *La sémantique du prototype. Catégories et sens lexical.* Paris: Presses universitaires de France.

Koeneman, M., Goedhart, M., & Ossevoort, M. (2013). Introducing pre-university students to primary scientific literature through argumentation analysis. *Research in Science Education*, *43*(5), 2009-2034.

Laissus, Y. (1995). *Le muséum national d'histoire naturelle.* Paris: Gallimard.

Laissus, Y. & Torlais, J. (1986). *Le jardin du roi et le collège royal dans l'enseignement des sciences au XVIII^e siècle.* Paris: Hermann.

Lalevée, F. (2014). Bilan d'érosion d'un cours d'eau alpin : L'Isère à Grenoble. Quelques modalités de la construction du savoir scientifique : L'exploitation d'un article scientifique avec des élèves de terminale S. *Biologie Géologie*, *2*, 115-152.

Lance, C. (2013). *Respiration et photosynthèse. Histoire et secrets d'une équation.* Grenoble: EDP Sciences.

Le Guyader, H. (1986). Objectivité et taxinomie: Des systèmes et méthodes à la classification naturelle. Dans P. Tassy (dir.), *L'ordre et la diversité du vivant* (p. 69-82). Paris: Fayard.

Leach, J., Driver, R., Scott, P., & Wood-Robinson, C. (1995). Children's ideas about ecology 1: Theoretical background, design and methodology. *International Journal of Science Education*, *17*(6), 721-732.

Leclerc, Comte de Buffon, G.-L. (1753). *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du roy* (Vol. 4). Paris: Imprimerie Royale.

Lecointre, G. (2004). Le statut de la parcimonie. *Biosystema*, *22*, 7-14.

Lecointre, G. (dir). (2008). *Comprendre et enseigner la classification du vivant.* Paris: Belin.

Lecointre, G. (2009a). Filiation. Dans T. Heams, P. Huneman, G. Lecointre & M. Silberstein (dir.), *Les mondes darwiniens* (p. 273-330). Paris: Editions Matériologiques.

Lecointre, G. (2009b). *Guide critique de l'évolution.* Paris: Belin.

Lecointre, G. (2010). Préface. Dans G. Guillot, *La planète fleurs.* Paris: Quae.

Lecointre, G. (2012a). *Les sciences face aux créationnismes : Ré-expliciter le contrat méthodologique des chercheurs.* Versailles: Quae.

Lecointre, G. (2012b). Pourquoi nos classifications changent-elles ? *Biofutur*, 27-29.

Lecointre, G. & Le Guyader, H. (2001). *Classification phylogénétique du vivant.* Paris: Belin.

Lecourt, D. (1974). *Pour une critique de l'épistémologie (Bachelard, Canguilhem, Foucault).* Paris: François Maspéro.

Lederman, N. G. (2006). Research on nature of science: Reflections on the past, anticipations of the future. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, *7*(1), Foreword 1-11.

Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present and future. Dans S. K. Abell & N. G. Lederman (dir.), *Handbook of research on science education* (p. 831–879). London: Lawrence Erlbaum Associates.

Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissage dans les sciences de la vie. Étude de quelques débats scientifiques dans la classe dans deux thèmes biologiques : Nutrition et évolution.* Thèse de doctorat. Université de Nantes. Récupéré du site http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00376892/fr/

Lhoste, Y. & Peterfalvi, B. (2009). Problématisation et perspective curriculaire en SVT : L'exemple du concept de nutrition. *Aster*, *49*, 79-108.

Lin, C. Y. & Hu, R. (2003). Students' understanding of energy flow and matter cycling in the context of the food chain, photosynthesis, and respiration. *International Journal of Science Education*, *25*(12), 1529-1544.

Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, *77*(3), 293-300.

Linné (Von), C. (1735). *Systema naturae: Per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonomis, locis.* Leiden.

Linné (Von), C. (1737). *Methodus sexualis. Systema a staminibus et pistillis* (Vol. 8). Lugduni Batavorum.

Macherey, P. (2009). *De Canguilhem à Foucault. La force des normes.* Paris: La Fabrique. (Ouvrage original publié en 1964)

Magntorn, O. & Helldén, G. (2007). Reading new environments: Students' ability to generalise their understanding between different ecosystems. *International Journal of Science Education*, *29*(1), 67-100.

Malécot, V. (2008). La nomenclature botanique : Les codes internationaux de nomenclature botanique et horticole. Dans D. Prat, A. Raynal-Roques & A. Roguenant (dir.), *Peut-on classer le vivant? Linné et la systématique aujourd'hui.* (p. 403-409). Paris: Belin.

Manrique, A., de Hosson, C., & Robert, A. (2016). Les cartes conceptuelles : Un premier pas vers l'analyse des pratiques effectives d'enseignement en cours de physique à l'université. Dans *Actes des 9e rencontres scientifiques de l'ARDiST, Lens* (p. 312-317). Lens: ARDiST. Récupéré du site http://www.ardist.org/rencontres-scientifiques/colloques-scientifiques/

Margulis, L. (1968). Evolutionary criteria in thallophytes: A radical alternative. *Science*, *161*(3845), 1020-1022.

Margulis, L. (1970). *Origin of eukaryotic cells : Evidence and research implications for a theory of the origin and evolution of microbial, plant, and animal cells on the precambrian earth.* New Haven Connecticut: Yale University Press.

Margulis, L. (1971). Whittaker's five kingdoms of organisms: Minor revisions suggested by considerations of the origin of mitosis. *Evolution*, *25*(1), 242-245.

Matthews, M. R. (2014). *International handbook of research in history, philosophy and science teaching.* Dordrecht : Springer.

Maurines, L. & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : L'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (3), 271-305.

Maurines, L. & Beaufils, D. (2013). Teaching the nature of science in physics courses: The contribution of classroom historical inquiries. *Science & Education*, *22*(6), 1443-1465.

Maurines, L., Gallezot, M., Ramage, M. -J., & Beaufils, D. (2013). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la terre. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (7), 19-52.

Mayr, E. (1942). *Systematics and the origin of species.* New York: Columbia University Press.

Mayr, E. (1968). Theory of biological classification. *Nature*, *220*, 545-548.

Mayr, E. (1969). *Principles of systematic zoology.* New York: MacGraw Hill.

Mayr, E. (1982). *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance.* Cambridge-London: Belknap Presse of Harvard University Press.

Mayr, E. (1989). *Histoire de la biologie: Diversité, évolution et hérédité.* Paris : Fayard. (Ouvrage original publié en 1982).

Mayr, E. (1990). A natural system of organisms. *Nature*, *348*, 491.

Mayr, E. (1990). When is historiography whiggish? *Journal of the History of Ideas*, *51*(2), 301-309.

Mayr, E. (1998). *Qu'est-ce que la biologie?* Paris : Fayard.

Mayr, E. (1998). Two empires or three? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(17), 9720-9723.

Mayr, E. & Bock, W. J. (2002). Classifications and other ordering systems. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, *40*(4), 169-194.

McClure, J. R., Sonak, B., & Suen, H. K. (1999). Concept map assessment of classroom learning: Reliability, validity, and logistical practicality. *Journal of Research in Science Teaching*, *36*(4), 475-492.

MEN. (2008). Programmes de sciences de la vie et de la terre du collège. *Bulletin Officiel Du Ministère De L'Éducation Nationale, Numéro Spécial N°6 Du 28 Août 2008.*

MEN. (2010a). Programme d'enseignement spécifique de sciences de la vie et de la terre en classe de première de la série scientifique. *Bulletin Officiel Spécial N°9 Du 30 Septembre 2010.*

MEN. (2010b). Programmes de sciences de la vie et de la terre pour la classe de seconde. *Bulletin Officiel Du Ministère De L'Éducation Nationale, Numéro Spécial N°4 Du 29 Avril 2010.*

MEN. (2011). Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité des sciences de la vie et de la terre de la série scientifique - classe terminale. *Bulletin Officiel Spécial N°8 Du 13 Octobre 2011.*

Meyer, S., Reeb, C., & Bosdeveix, R. (2008). *Botanique. Biologie & physiologie végétales* (2e ed.). Paris: Maloine.

Mintzes, J. J., Wandersee, J. H., & Novak, J. D. (2001). Assessing understanding in biology. *Journal of Biological Education*, *35*(3), 118–124.

Morange, M. (2011). *La vie, l'évolution et l'histoire.* Paris: Odile Jacob.

Mortensen, M. F. (2010). Museographic transposition: The development of a museum exhibit on animal adaptations to darkness. *Education & Didactique*, *4*(1), 115-138.

Nesbit, J. C. & Adesope, O. O. (2006). Learning with concept and knowledge maps: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, *76*(3), 413-448.

Norris, S. P., Falk, H., Federico-Agraso, M., Jiménez-Aleixandre, M. P., Phillips, L. M., & Yarden, A. (2009). Reading science texts—epistemology, inquiry, authenticity—A rejoinder to Jonathan Osborne. *Research in Science Education*, *39*(3), 405-410.

Novak, J. D. (2010). Learning, creating, and using knowledge: Concept maps as facilitative tools in schools and corporations. *Journal of E-Learning and Knowledge Society* , *6*(3), 21-30.

Novak, J. D. & Cañas, A. J. (2008). *The theory underlying concept maps and how to construct and use them* (Technical Report IHMC CmapTools 2006-01 Rev 01-2008). Récupéré du site http://cmap.ihmc.us/docs/pdf/TheoryUnderlyingConceptMaps.pdf

Novak, J. D. & Gowin, D. B. (1984). *Learning how to learn.* New York: Cambridge University Press.

Novak, J. D. & Musonda, D. (1991). A twelve-year longitudinal study of science concept learning. *American Educational Research Journal*, *28*(1), 117-153.

Novick, L. R. & Catley, K. M. (2013). Reasoning about evolution's grand patterns: College students' understanding of the tree of life. *American Educational Research Journal*, *50*(1), 138-177.

Novick, L. R. & Catley, K. M. (2014). When relationships depicted diagrammatically conflict with prior knowledge: An investigation of students' interpretations of evolutionary trees. *Science Education*, *98*(2), 269-304.

Orange Ravachol, D. (2003). *Utilisations du temps et explications en sciences de la terre par les élèves de lycée : Étude dans quelques problèmes géologiques.* Thèse de doctorat. Université de Nantes. Récupéré du site http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00480254/fr/

Orange Ravachol, D. (2007). Classifications biologiques et problématisations. *Recherche En Education*, *3*, 51-67.

Orange, C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. Dans Martinand J-L. (dir.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences.* Paris : INRP.

Orange, C. (2000). *Idées et raisons : Construction de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en sciences de la vie et de la terre.* Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en sciences de l'éducation. Université de Nantes.

Orange, C. (2002). Apprentissages scientifiques et problématisation. *Les Sciences De L'éducation, Pour L'ère Nouvelle*, *35*(1), 25-42.

Orange, C. (2003). Un exemple de problématisation en biologie : Claude Bernard et le milieu intérieur. *Actes des troisièmes rencontres scientifiques de l'ARDiST* , 231-237.

Orange, C. (2005). Problème et problématisation dans l'enseignement scientifique. *Aster*, *40*, 3-11.

Orange, C. (2007). Quel milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la terre? *Education Et Didactique*, *1*(2), 37-56.

Orange, C. (2010a). Étude des situations "forcées" : Quelles méthodes pour les recherches didactiques s'appuyant fortement sur les productions des élèves et de la classe. (Actes du congrès de l'Actualité de la recherche en éducation et en formation (AREF), Université de Genève). Récupéré du site https://plone2.unige.ch/aref2010/communications-orales

Orange, C. (2010b). Situations forcées, recherches didactiques et développement du métier enseignant. *Recherches En Éducation*, *Hors série n°2*, 73-85.

Orange, C. (2012a). Comment les plantes font-elles penser les petits et les grands? *Alliage*, *64*, 113-123.

Orange, C. (2012b). *Enseigner les sciences. Problèmes, débats et savoirs scientifiques en classe.* Bruxelles: De Boeck.

Orange, C. (2014). Schèmes argumentatifs et problématisation dans des débats en classe sur le mouvement du membre supérieur (CM1-CM2). *Revue SKHOLÊ*, *18*(1), 491-500.

Orange, C. & Orange Ravachol, D. (2007). Problématisation et mise en texte des savoirs scolaires : Le cas d'une séquence sur les mouvements corporels au cycle 3 de l'école élémentaire. Dans *Actes des cinquièmes journées scientifiques de l'ARDiST, La Grande Motte, octobre 2007* (p. 305-312). Récupéré du site http://ardist.org/wp-content/Actes_2007.pdf

Orange, C. & Orange Ravachol, D. (2013). Le concept de représentation en didactique des sciences : Sa nécessaire composante épistémologique et ses conséquences. *Recherches En Education*, *17*, 46-61.

Orange, C., Lhoste, Y., & Orange Ravachol, D. (2008). Argumentation, problématisation et construction de concepts en classe de sciences. Dans C. Buty et C. Plantin (dir.), *Argumenter en classe de sciences.* Lyon: INRP.

Osborne, J. (2009). The potential of adapted primary literature (APL) for learning: A response. *Research in Science Education*, *39*(3), 397-403.

Ouvrier-Buffet, C. (2006). Classer et définir des processus connexes. *Grand N*, *78*, 83-98.

Owen, R. (1860). *Paleontology or a systematic summary of extinct animals and their geological relations.* Edinburgh: Adam and Charles Black.

Özdemir, G. & Clark, D. B. (2007). An overview of conceptual change theories. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, *3*(4), 351-361.

Palmer, J. D., Soltis, D. E., & Chase, M. W. (2004). The plant tree of life: An overview and some points of view. *American Journal of Botany*, *91*(10), 1437-1445.

Parfrey, L. W., Barbero, E., Lasser, E., Dunthorn, M., Bhattacharya, D., Patterson, D. J., *et al.* (2006). Evaluating support for the current classification of eukaryotic diversity. *PLoS Genet*, *2*(12), e220.

Patrick, J. (1986). Les classifications botaniques. Dans P. Tassy (dir.), *L'ordre et la diversité du vivant* (p. 51-67). Paris: Fayard.

Pestre, D. (2007). L'analyse de controverses dans l'étude des sciences depuis trente ans. *Mil Neuf Cent. Revue D'histoire Intellectuelle*, *25*(1), 29-43.

Peterfalvi, B. (2008). Comprendre la théorie de l'évolution, une course d'obstacles ? Dans M. Coquidé & S. Tirard (dir.), *L'évolution du vivant. Un enseignement à risque* (p. 109-121). Paris: Vuibert : ADAPT-SNES.

Peterfalvi, B., Rumelhard, G., & Vérin, A. (1987). Relations alimentaires. *Aster*, *3*, 111-189.

Phillips, L. M. & Norris, S. P. (2009). Bridging the gap between the language of science and the language of school science through the use of adapted primary literature. *Res Sci Educ*, *39*(3), 313-319.

Piaget, J. & Garcia, R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences.* Paris: Flammarion.

Plantin, C. (1996). Le trilogue argumentatif. Présentation de modèle, analyse de cas. *Langue Française*, *112*(1), 9-30.

Plantin, C. (2005). *L'argumentation. Histoire, théories, perspectives.* Paris: Que sais-je ? PUF.

Poincaré, H. (1905). *La valeur de la science.* Paris: Flammarion.

Popper, K. R. (1998). *La connaissance objective.* Paris: Aubier. (Ouvrage original publié en 1972)

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, *66*(2), 211-227.

Prévost, P. & Jacobi, D. (1994). Les cartes conceptuelles : Outil cognitif, instrument de communication ou moyen de recherche ? *Didaskalia*, *5*, 119-123.

Reydon, T. A. C. (2013). Classifying life, reconstructing history and teaching diversity: Philosophical issues in the teaching of biological systematics and biodiversity. *Science & Education*, *22*(2), 189-220.

Rodríguez-Ezpeleta, N., Brinkmann, H., Burey, S. C., Roure, B., Burger, G., Löffelhardt, W., *et al.* (2005). Monophyly of primary photosynthetic eukaryotes: Green plants, red algae, and glaucophytes. *Current Biology : CB*, *15*(14), 1325-30.

Rothschild, L. J. (1989). Protozoa, protista, protoctista: What's in a name? *Journal of the History of Biology*, *22*(2), 277-305.

Ruggiero, M. A., Gordon, D. P., Orrell, T. M., Bailly, N., Bourgoin, T., Brusca, R. C., *et al.* (2015). A higher level classification of all living organisms. *PloS One*, *10*(4), e0119248.

Ruiz-Primo, M. A. & Shavelson, R. J. (1996). Problems and issues in the use of concept maps in science assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, *33*, 569-600.

Rumelhard, G. (1985). Quelques représentations à propos de la photosynthèse. *Aster*, *1*, 37-66.

Rumelhard, G. (2011). Le processus de dogmatisation. *Recherches En Didactique*, 165-177.

Rumpho, M. E., Worful, J. M., Lee, J., Kannan, K., Tyler, M. S., Bhattacharya, D., *et al.* (2008). Horizontal gene transfer of the algal nuclear gene psbo to the photosynthetic sea slug *Elysia chlorotica*. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *105*(46), 17867-71.

Ryman, D. (1974). Childrens' understanding of the classification of living organisms. *Journal of Biological Education*, *8* (3), 140–144.

Rymell, R. (1999). What defines a plant? *Primary Science Review*, *57*, 23-25.

Sabine, C. L. (2014). Global carbon cycle. Dans *ELS.* Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Sachs, J. V. & Robin, N. (2010). *Histoire de la botanique du XVI^e^ siècle à 1860.* Chilly-Mazarin: SenS Association Sciences en situation. (Ouvrage original publié en 1892)

Sagan, L. (1967). On the origin of mitosing cells. *Journal of Theoretical Biology*, *14*(3), 225-274.

Saitou, N. & Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, *4*(4), 406-425.

Saltiel, E. & Viennot, L. (1984). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning students ? Dans P. Linjse (dir.), *The many faces of teaching and learning mechanics.* (p. 199-214). Utrecht: GIREP/SVO/UNESCO.

Sandvik, H. (2008). Tree thinking cannot taken for granted: Challenges for teaching phylogenetics. *Theory in Biosciences*, *127*(1), 45-51.

Sapp, J. (2007). The structure of microbial evolutionary theory. *Stud Hist Philos Biol Biomed Sci*, *38*(4), 780-95.

Sapp, J. (2009). *The new foundations of evolution: On the tree of life.* New York: Oxford University Press.

Sapp, J. (2012). Too fantastic for polite society: A brief history of symbiosis theory. Dans D. Sagan (dir.), *Lynn Margulis: The life and legacy of a scientific rebel* (p. 54-73). White River Junction: Chelsea Green.

Scamardella, J. M. (1999). Not plants or animals: A brief history of the origin of kingdoms Protozoa, Protista and Protoctista. *International Microbiology*, *2*(4), 207-216.

Schmidt-Lebuhn, A. N. (2014). “Evolutionary” classifications do not have any information content-a reply to stuessy and hörandl. *Cladistics*, *30*(3), 229-231.

Schmitt, S. (2006). *Aux origines de la biologie moderne : L'anatomie comparée d'Aristote à la théorie de l'évolution.* Paris: Belin.

Schussler, E. E. (2008). From flowers to fruits: How children’s books represent plant reproduction. *International Journal of Science Education*, *30*(12), 1677-1696.

Schuster, J. A. (1995). The problem of 'whig history" in the history of science. Dans *The scientific revolution: An introduction to the history & philosophy of science* (p. 14-18). Récupéré du site http://descartes-agonistes.com/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=38&Itemid=53

Selosse, M. -A. (2010). Les organismes chimériques : Le sexe "lent" des eucaryotes. Dans P.-H. Gouyon (dir.), *Aux origines du sexe* (p. 46-67). Paris: Fayard.

Selosse, M. A. (2008). Que sont devenus animaux, végétaux et champignons ? Dans D. Prat, A. Raynal-Roques & A. Roguenant (dir.), *Peut-on classer le vivant? Linné et la systématique aujourd'hui* (p. 225-233). Paris: Belin.

Selosse, M. A. (2011). L'évolution par fusion. *Pour La Science*, *400*, 50-56.

Sève, L. (1980). *Une introduction à la philosophie marxiste: Suivie d'un vocabulaire philosophique.* Paris: Editions sociales.

Simpson, A. G. & Roger, A. J. (2004). The real kingdoms of eukaryotes. *Current Biology*, *14*(17), R693-R696.

Sneath, P. H. A. & Sokal, R. R. (1963). *Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification.* San Francisco: Freeman.

Stuessy, T. F. (2009). *Plant taxonomy : The systematic evaluation of comparative data.* New York: Columbia University Press.

Stuessy, T. F. & Hörandl, E. (2014). The importance of comprehensive phylogenetic (evolutionary) classification-a response to Schmidt-Lebuhn's commentary on paraphyletic taxa. *Cladistics*, *30*(3), 291-293.

Sutton, C. (1995). Quelques questions sur l'écriture et la science: Une vue personnelle d'outre-manche. *Repères*, (12), 37-52.

Tassy, P. (1998). *L'arbre à remonter le temps : Les rencontres de la systématique et de l'évolution.* Paris: Diderot Éditeur. (Ouvrage original publié en 1991)

Tassy, P. (2003). La renaissance de la systématique. *Dossier Évolution SagaScience CNRS.* Récupéré du site http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/articles/chap8/tassy.html

Tassy, P. (2014). Fait et théorie : Quelles connaissances de base pour la cladistique structurale ? Dans P. Deleporte et G. Lecointre (dir.) *Biosystema 24 : philosophie de la systématique* (p. 99-117). Paris: Editions Matériologiques. (Ouvrage original publié en 2005)

Tiberghien, A. (1994). Choix sous-jacents à la construction de représentations spatiales de concepts. *Didaskalia*, *5*, 53-62.

Toulmin, S. E. (1973). *L'explication scientifique.* Paris: Armand Colin. (Ouvrage original publié en 1961)

Toulmin, S. E. (1993). *Les usages de l'argumentation.* Paris: Presses Universitaires de France. (Ouvrage original publié en 1958)

Tribollet, B., Langlois, F., & Jacquet, L. (2000). Protocoles d'emploi des cartes conceptuelles au lycée et en formation des maîtres. *Tréma*, (18), 61-78.

Tunnicliffe, S. D. & Reiss, M. J. (2000). Building a model of the environment: How do children see plants? *Journal of Biological Education*, *34*(4), 172-177.

Viennot, L. (1985). Analysing students' reasoning in science: A pragmatic view of theoretical problems. *The European Journal of Science Education*, *7*(2), 151-162.

Viennot, L. & Rainson, S. (1999). Design and evaluation of a research-based teaching sequence: The superposition of electric field. *International Journal of Science Education*, *21*(1), 1-16.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, *4*(1), 45-69.

Vygotski, L. S. (1997). *Pensée et langage.* Paris: La dispute. (Ouvrage original publié en 1934)

Wallace, J. D. & Mintzes, J. J. (1990). The concept map as a research tool: Exploring conceptual change in biology. *Journal of Research in Science Teaching*, *27*(10), 1033-1052.

Wang, J. R. (2007). Students thinking and alternative conceptions of transport systems in plants: A follow-up study. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *5*(2), 307-328.

Whittaker, R. H. (1957). The kingdoms of the living world. *Ecology*, *38*(3), 536–538.

Whittaker, R. H. (1959). On the broad classification of organisms. *The Quarterly Review of Biology*, *34*(3), 210-226.

Whittaker, R. H. (1969). New concepts of kingdoms of organisms. *Science*, *163*(3863), 150-160.

Whittaker, R. H. & Margulis, L. (1978). Protist classification and the kingdoms of organisms. *Biosystems*, *10*(1-2), 3-18.

Wilson, T. & Cassin, J. (1863). On a third kingdom of organized beings. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, *15*, 113-121.

Winsor, M. P. (2003). Non-essentialist methods in pre-darwinian taxonomy. *Biology and Philosophy*, *18*(3), 387-400.

Winsor, M. P. (2006a). The creation of the essentialism story: An exercise in metahistory. *History and Philosophy of the Life Sciences*, *28*(2), 149-74.

Winsor, M. P. (2006b). Linnaeus's biology was not essentialist. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *93*(1), 2-7.

Woese, C. R. (1987). Bacterial evolution. *Microbiological Reviews*, *51*(2), 221-271.

Woese, C. R. & Fox, G. E. (1977). Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *74*(11), 5088-5090.

Woese, C. R., Kandler, O., & Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *87*(12), 4576.

Table des figures et des tableaux

1. Table des figures

Figure 1 : le concept de grade (ou groupe paraphylétique) illustré à partir de deux exemples. D'après Meyer, Reeb & Bosdeveix, 2008 33
Figure 2 : arbre phylogénétique du vivant, modifié à partir de Adl *et al.* (2012) et Burki (2014) 38
Figure 3 : origine des plastes par endosymbiose primaire ou secondaire 39
Figure 4 : arbre réticulé ou réseau phylogénétique, reproduit de (1999, p. 2127) 40
Figure 5 : Schéma de la structuration de la reconstruction didactique. Reproduit de C. de Hosson (2011, p. 35) 57
Figure 6 : schéma de la structuration de notre recherche 64
Figure 7 : schématisation des questions de recherche (QR) correspondant aux trois parties de notre thèse 66
Figure 8 : La façon d'inférer et d'interpréter les conceptions (d'après Astolfi *et al.*, 1985, p. 12). 77
Figure 9 : famille de situations *via* des formes de raisonnement à un ensemble de caractéristiques de réponses, repérées par le chercheur. Modifié d'après L. Viennot, 1985, p. 153. 78
Figure 10 : carte de France indiquant la localisation des universités ayant participé à l'enquête et le nombre de réponses obtenues 83
Figure 11 : nombre de réponses par université et aperçu de l'ensemble des 333 questionnaires reçus 84
Figure 12 : logique du questionnaire 86
Figure 13 : informations fournies pour chaque espèce de la question 2 87
Figure 14 : les treize espèces de la question 2 et leur justification. 88
Figure 15 : étapes de l'analyse des données permettant 91
Figure 16 : comparaison d'une cellule végétale (à gauche) et d'une cellule animale (à droite), réalisée par une étudiante lors de l'enquête exploratoire (2011) 98

Figure 17 : raisonnement par inclusion et exclusion 105
Figure 18 : graphique présentant l'occurrence de chaque conception identifiée par l'analyse supervisée 111
Figure 19 : dendrogramme produit par classification hiérarchique (h-clust) utilisant la méthode d'agrégation de Ward. 113
Figure 20 : projection par conception des étudiants sur le premier plan de l'ACM 115
Figure 21 : analyse des correspondances multiples (ACM) réalisée sur les étudiants CFC...118
Figure 22 : analyse des correspondances multiples (ACM) réalisée sur les étudiants CFC.. 119
Figure 23 : schéma proposé par l'étudiant 179 en réponse à la question 1 123
Figure 24 : graphique du nombre de réponses NSP (« ne sais pas ») pour chaque espèce (échantillon de 295 étudiants « non indécis »). 130
Figure 25 : graphique du nombre d'étudiants mobilisant des arguments d'inclusion ou d'exclusion selon chaque espèce.. 132
Figure 26 : quatre réponses concernant la souris (*Mus*) soulignent une certaine ironie. 137
Figure 27 : schématisation réalisée par l'étudiant 244 du rôle des végétaux dans les écosystèmes 140
Figure 28 : graphique du nombre de réponses V, NV et NSP concernant l'orobanche..... 146
Figure 29 : comparaison du pourcentage d'étudiants répondant que l'orobanche est végétale et que les végétaux ne sont pas monophylétiques (Q4) pour chaque conception fonctionnelle. 149
Figure 30 : classification de Bory de Saint Vincent, reproduit de Ibid., p. 659..... 165
Figure 31 : arbre du vivant proposé par Haeckel (1866, vol. 2 p. 463) 170
Figure 32 : arbre du règne Plantae proposé par Haeckel (1866, vol. 2, p. 465)..... 171
Figure 33 : les dix groupes du règne Protista de Haeckel (1869, p. 330-331) 175
Figure 34 : arbre du règne végétal. Table V. Reproduit de Haeckel 1880, p. 112..... 176
Figure 35 : modélisation de la problématisation réalisée par E. Haeckel et fondant sa classification, en focalisant l'analyse sur les végétaux 180
Figure 36 : phylogénie proposée par H. F. Copeland (1938, p. 410)..... 186
Figure 37 : modélisation de la problématisation réalisée par H. F. Copeland et fondant sa classification, en focalisant principalement l'analyse sur les végétaux 187
Figure 38 : Représentation des trois règnes de Whittaker reposant sur trois rôles écologiques. Reproduit de Hagen, 1996, p. 15..... 192
Figure 39 : modélisation de la problématisation développée par R. H. Whittaker (1957) pour expliquer la nécessité de distinguer les végétaux des champignons 193

Figure 40 : représentation du système à quatre règnes de Whittaker (1959, p. 217)..... 194
Figure 41 : représentation du système à cinq règnes de Whittaker (1969, p. 157)..... 196
Figure 42 : modélisation de la problématisation développée par R.H. Whittaker (1969) pour expliquer la nécessité de distinguer cinq règnes du vivant dont un règne végétal (Plantae) 197
Figure 43 : classification de L. Margulis modifiant le système à cinq règnes de Whittaker (1969). Reproduit de Margulis, 1971, p. 244. 202
Figure 44 : représentation de l'une des trois « phylogénies » des Eucaryotes proposées par Cavalier-Smith (1981, p. 473)..... 208
Figure 45 : comparaison de la cladification et de la classification. * : groupe paraphylétique. Reproduit de Cavalier-Smith (1998, p. 211)..... 211
Figure 46 : les neufs règnes eucaryotiques dont quatre règnes végétaux (que nous encadrons en vert). Reproduit de Cavalier-Smith, 1981, p. 462. 212
Figure 47 : modélisation de la problématisation développée par T. Cavalier-Smith (1981) pour expliquer le polyphylétisme des végétaux 214
Figure 48 : la classification du vivant à six règnes, dont deux règnes végétaux encadrés en vert (par nous). Reproduit de Cavalier-Smith, 1981, p. 477. 215
Figure 49 : classification à huit règnes. Reproduit de Cavalier-Smith, 1993, p. 955. 216
Figure 50 : arbre phylogénétique universel. Les flèches pointent les groupes animaux et végétaux qui se trouvent « marginalisés » dans cet arbre. Modifié d'après Woese, 1987, p. 231..... 218
Figure 51 : arbre des relations phylogénétiques supposées. Reproduit de Cavalier-Smith, 1998, p. 206..... 220
Figure 52 : arbre phylogénétique des Eucaryotes comportant cinq super-groupes et présentant l'hypothèse des Chromalveolata. Les groupes encadrés en noir possèdent des plastes. Reproduit de Keeling, 2004, p. 1482. 223
Figure 53 : évolution des plastes et endosymbiose. Reproduit et modifié, d'après de Keeling, 2004, p. 488..... 224
Figure 54 : arbre phylogénétique des Eucaryotes. Reproduit de Burki, 2014, p. 6. 228
Figure 55 : modélisation de la problématisation développée par F. Burki pour expliquer les relations phylogénétiques au sein des Eucaryotes..... 229
Figure 56 : origine du plaste au sein des lignées SAR et Hacrobia (en pointillé, car la monophylie des Hacrobia n'est pas très robuste). Extrait de Keeling, 2013, p. 589 (modifié)..... 230

Figure 57 : comparaison de l'importance relative des différents groupes dans les arbres de Whittaker (1969), à gauche, et Woese (1987), à droite..... 242
Figure 58 : arbre généalogique ('stammbaum') de l'Homme. Reproduit de Haeckel (1877), traduit par C. Letourneau (version originale parue en 1874). 244
Figure 59 : exemple de carte conceptuelle en réponse à la question : « Comment le carbone minéral est-il transformé en carbone organique et quelles en sont les conséquences écologiques ? » 275
Figure 60 : les trois pôles de questions de recherche (QR) liées à l'expérimentation didactique ; la surface du cercle gris indique l'importance relative de chaque pôle dans la thèse..... 281
Figure 61 : schéma du cycle de carbone, extrait de Sabine (2014, p. 7)..... 286
Figure 62 : raisons majeures du choix des trois articles de systématique des Eucaryotes..... 288
Figure 63 : la frise chronologique fournie en accompagnement des articles..... 303
Figure 64 : méthodologie correspondant au pôle 1 (recherche de significations) 304
Figure 65 : modèle de Toulmin de l'analyse monologale d'une argumentation (1993, p. 128). Reproduit de Lhoste (2008, p. 145)..... 306
Figure 66 : le modèle du trilogue argumentatif. Reproduit de Plantin (1996, p. 11). D0 et D1 : discours reçu / discours minoritaire ; Arg : arguments 307
Figure 67 : Méthode de notation d'une carte utilisée par Novak et Gowin (1984). Reproduit de McClure *et al.*, 1999, p.483..... 308
Figure 68 : matrice de présence des termes sélectionnés par carte (en rouge : présence / en blanc : absence). 313
Figure 69 : arbre de ressemblance (dendrogramme) des cartes conceptuelles résultant d'une classification hiérarchique. Chaque carte a un code formé d'une lettre (A : premier groupe ; B : second groupe) et d'un chiffre..... 318
Figure 70 : photographie du dispositif d'acquisition des données audio-visuelles pendant la réalisation de carte conceptuelle par binôme 319
Figure 71 : synthèse présentant le processus d'analyse d'une carte conceptuelle..... 321
Figure 72 : graphique présentant la répartition des différentes conceptions..... 323
Figure 73 : analyse monologale de la thèse argumentative expliquant la non monophylie des végétaux développée par Manuella, Héloïse et Aude 333
Figure 74 : schéma montrant une dissonance concernant le recours aux principes classificatoires 335
Figure 75 : carte conceptuelle du groupe B4 (34 propositions)..... 340

Figure 76 : carte conceptuelle du groupe B6, montrant une relation entre les conceptions des végétaux et différents systèmes de classification 341
Figure 77 : carte conceptuelle du groupe B8 (34 propositions) 342
Figure 78 : extrait de la carte conceptuelle du groupe B7 illustrant un usage du terme classification fonctionnelle regroupant deux types de classifications bien différents 343
Figure 79 : représentation de la présence (rouge) ou absence (blanc) de concepts dans les 13 cartes 345
Figure 80 : les trois thèses avancées concernant le problème de la définition des végétaux dans l'article de Burki. 347
Figure 81 : structure argumentative de l'épisode concernant le problème de la définition des végétaux dans l'article de Burki au sein du groupe 1 (débat interne préliminaire) 352
Figure 82 : structure argumentative de l'épisode 23 du débat collectif concernant le problème de définition des végétaux dans l'article de Burki 354
Figure 83 : nombre de prises de parole pour chaque étudiant et selon les articles lus ou non 376
Figure 84 : citation des quatre articles dans les treize cartes conceptuelles. Whittaker et Cavalier-Smith sont regroupés car cités dans les mêmes cartes. En rouge : présence dans la carte. 378
Figure 85 : carte conceptuelle A7 387
Figure 86 : les différents regroupements conceptuels à 16'47'' 391
Figure 87 : introduction de la dichotomie « classés / définis » (carte à 25'26'') 395
Figure 88 : zoom sur le décalage entre une définition absolue des végétaux et la dépendance à des conceptions qui évoluent historiquement 398
Figure 89 : état de la carte à 49' lors de la discussion de liens, non représentés, entre type de classifications, méthodes et techniques (394) 399
Figure 90 : zoom sur la carte soulignant des liens que nous souhaitons questionner 400
Figure 91 : état de la carte à 20' présentant l'ensemble des concepts groupés mais non reliés 409
Figure 92 : état de la carte du groupe A3 à 43' 410
Figure 93 : les raisons de l'absence d'un élément de discours ou d'un lien conceptuel 413
Figure 94 : Carte conceptuelle du groupe A7 avec ajout (en rouge) de liens discutés lors de la construction de la carte 415
Figure 95 : branche de la carte faisant l'objet de la présente analyse (les autres branches ont été masquées) 417

Figure 96 : les quatre « caricatures » soumises à la critique de la classe. Reproduit de Orange (2014, p. 493) 422
Figure 97 : modalités d'analyse de l'ensemble des cartes conceptuelles 439
Figure 98 : modalités d'analyse approfondie de la construction de cartes conceptuelles sélectionnées..... 440
Figure 99 : relation dialectique entre sphère historique et sphère didactique..... 445
Figure 100 : hexagone des raisonnements pouvant faire obstacle concernant les classifications 467
Figure 101 : exemple de groupes emboîtés réalisés en classe de sixième 475
Figure 102 : classification présentée sous forme de groupes emboîtés (manuel SVT de 6e, édition Magnard, 2013, 2e de couverture)..... 476
Figure 103 : exemple extrait d'un manuel de SVT de seconde (Bordas édition 2010, p. 43), *c'est nous qui encadrons* 477
Figure 104 : apparente superposition des conceptions phylogénétiques et fonctionnelle des végétaux en considérant une biodiversité limitée 478
Figure 105 : synthèse des principaux résultats de la recherche 482

2. Table des tableaux

Tableau 1 : laboratoires affiliés au CNRS en 2016 et affichant le terme « végétal » et/ou « plantes » dans leur nom d'équipe..... 46
Tableau 2 : aperçu de la grille de codage. En gras : information fournie en question 2..... 92
Tableau 3 : codage des données pour l'étudiant 1 93
Tableau 4 : codage de la réponse à la première question de l'étudiant 1 (codes en annexe, p. 547)..... 93
Tableau 5 : présentation des cinq conceptions envisagées par l'analyse *a priori*..... 95
Tableau 6 : mode d'identification des conceptions strictes permettant de programmer le script R 100
Tableau 7 : mode d'identification des conceptions élargies permettant de programmer le script R 101
Tableau 8 : synthèse de la méthodologie pour chaque question de recherche..... 109
Tableau 9 : résultats de l'analyse supervisée pour chaque conception stricte (s) et élargie. N : nombre d'étudiants par catégorie. % : pourcentage de l'effectif total (333)..... 110
Tableau 10 : exemples de réponses pour chaque conception..... 112

Tableau 11 : exemples montrant l'attachement à « la » cellule végétale..... 117
Tableau 12 : nombre et % d'étudiants répondant NSP pour chaque espèce..... 129
Tableau 13 : arguments codés présentés par ordre décroissant. 139
Tableau 14 : liste des arguments pour chaque code, par importance quantitative décroissante 140
Tableau 15 : arbres phylogénétiques représentés par des étudiants en question 4 pour justifier la non-monophylie des végétaux..... 142
Tableau 16 : réponses à la question 4 selon la conception des végétaux..... 144
Tableau 17 : réponses à la question 4 en distinguant la conception phylogénétique réduite des quatre autres 144
Tableau 18 : arguments les plus fréquents avancés pour justifier que l'orobanche est végétale. % calculé sur l'effectif de 276 étudiants répondant Orobanche = V 148
Tableau 19 : synthèse des principaux résultats pour chaque question de recherche..... 155
Tableau 20 : questions de recherche de l'étude historique 162
Tableau 21 : les deux hypothèses concernant la place des champignons 176
Tableau 22 : évolution des grandes divisions taxonomiques du vivant et de la nature du groupe des végétaux (synthèse non exhaustive) 235
Tableau 23 : trois types de définition mobilisées par Copeland (1938) 255
Tableau 24 : synthèse des principaux résultats de recherche de l'étude historique..... 264
Tableau 25 : comparaison des méthodologies de l'ingénierie didactique et des situations forcées 270
Tableau 26 : questions de recherche relevant du pôle 1 (recherches de significations) 282
Tableau 27 : questions de recherche relevant du pôle 2 (recherches de faisabilités)..... 283
Tableau 28 : questions de recherche relevant du pôle 3 (recherche méthodologique) sur l'utilisation des cartes conceptuelles comme outil de recherche didactique..... 285
Tableau 29 : comparaison des quatre articles choisis 291
Tableau 30 : programmation des différentes séances 293
Tableau 31 : scénario de la séquence de la reconstruction didactique..... 299
Tableau 32 : choix des 39 termes, association de termes ou de noyaux lexicaux et raisons de ce choix. 312
Tableau 33 : exemple des propositions pour les termes liés aux noyaux lexicaux « homolog/apomorph » 314
Tableau 34 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du bloc 1 316

Tableau 35 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du second pôle 316
Tableau 36 : récapitulatif de la méthodologie de recherche pour chaque question du bloc 3 322
Tableau 37 : comparaison de la répartition des différentes conceptions (ainsi que des catégories « autre » et « indécis) entre les deux enquêtes (en pourcentage) 324
Tableau 38 : classement des épisodes du débat par thème 325
Tableau 39 : analyse de l'épisode 6 lié à l'homologie dans les deux extraits d'articles d'écologie 327
Tableau 40 : analyse de l'épisode 13 lié à l'homologie dans l'article de Whittaker 329
Tableau 41 : analyse de l'épisode 20 lié à l'usage de l'homologie dans l'article de Cavalier-Smith 329
Tableau 42 : analyse de l'épisode 28 lié à l'usage de l'homologie dans l'article de Burki ... 331
Tableau 43 : analyse de l'épisode 16 lié à la non-monophylie des végétaux 333
Tableau 44 : comparaison des contraintes et des registres explicatifs dégagés par T. Cavalier-Smith et les étudiants, leur permettant de construire une même nécessité théorique 336
Tableau 45 : analyse des treize cartes concernant la pluralité des conceptions des végétaux et leur mise en relation explicite avec les différentes classifications 337
Tableau 46 : propositions (deux concepts reliés par un connecteur) des treize cartes relatives aux termes « utilitaire », « fonctionnel » 344
Tableau 47 : analyse d'extraits relatifs aux trois thèses A, B et C 351
Tableau 48 : différents types d'interventions du professeur dans le rôle du tiers au cours de l'épisode 23 356
Tableau 49 : dépendance aux techniques de la classification proposée par Cavalier-Smith (Ep. 21) 360
Tableau 50 : dépendance aux techniques et théories de la classification proposée par Burki lors du second débat de synthèse (Ep. 38) 361
Tableau 51 : analyse des cartes conceptuelles concernant les raisons de la rectification du groupe des végétaux entre les trois articles de systématique 362
Tableau 52 : extraits concernant les oppositions entre Cavalier-Smith et les classifications antérieures 366
Tableau 53 : extraits relatifs au parti-pris de R. H. Whittaker 368
Tableau 54 : extraits du débat relatif aux ambitions personnelles de Cavalier-Smith 369
Tableau 55 : le gradisme chez Whittaker et Cavalier-Smith 370

Tableau 56 : bilan des aspects de la NoS travaillés lors de notre reconstruction didactique, items d'après Maurines et Beaufils (2013) 373
Tableau 57 : nombre de prises de parole par étudiant selon les articles et étude statistique de l'effet de la lecture des articles sur la prise de parole 375
Tableau 58 : extraits du débat relatif aux articles d'écologie, en particulier celui de Gasparini 379
Tableau 59 : extraits relatifs aux difficultés d'identification des activités de classification ou de tri dans les articles d'écologie 382
Tableau 60 : analyse de la carte conceptuelle A7 pour les deux aspects de la consigne 388
Tableau 61 : questions posées par l'analyse de la carte conceptuelle A7 389
Tableau 62 : extraits correspondant à l'introduction du concept de « définition » des végétaux 390
Tableau 63 : introduction de la relation de dépendance entre les définitions et les conceptions des végétaux 392
Tableau 64 : mise en place des deux premières branches de la carte « sont classés dans » et « sont définis selon » 394
Tableau 65 : relations entre plusieurs concepts des branches « classifications » et « définition / conceptions » 396
Tableau 66 : le problème de l'autotrophie pour définir les végétaux 397
Tableau 67 : mise en relation orale et non graphique entre les techniques et les classifications 399
Tableau 68 : l'usage des caractères moléculaires en phénétique et cladistique 401
Tableau 69 : la cladistique et les différentes systématiciens 402
Tableau 70 : le gradisme et Linné 403
Tableau 71 : les classifications utilitaire et fonctionnelle 404
Tableau 72 : les méthodes probabilistes et leurs relations avec la cladistique et la phénétique 407
Tableau 73 : relation entre « l'endosymbiose » et « les contextes de pensées / théories de l'époque » 407
Tableau 74 : extraits relatifs à la démarche de construction de la carte 409
Tableau 75 : propos indiquant le manque de temps ressenti 411
Tableau 76 : extraits relatifs à la contrainte de produire une carte lisible 411
Tableau 77 : exemples illustrant les trois cas d'absence de concepts ou liens conceptuels ayant fait l'objet d'un échange argumenté (..... 414

Tableau 78 : analyse relative à la branche incluant l'autotrophie 419
Tableau 79 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 1 431
Tableau 80 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 2 438
Tableau 81 : synthèse des principaux résultats relatifs aux questions de recherche du pôle 3 442
Tableau 82 : synthèse des modes de raisonnement pouvant faire obstacle et leur instanciation 466
Tableau 83 : extraits du bulletin officiel de l'éducation nationale (BOEN) relatifs à différentes conceptions des végétaux dans les programmes de collège (2008) et lycée (2010, 2011) 473

Annexes

1. LE QUESTIONNAIRE 517

2. LA GRILLE DE CODAGE 527

3. ANALYSE DES TROIS ARTICLES PORTANT SUR LA SYSTÉMATIQUE DES EUCARYOTES (EN UTILISANT LA GRILLE DONNÉE AUX ÉTUDIANTS) 531

3.1. Analyse de l'article de Whittaker (1969) 531

3.2. Analyse de l'article de Cavalier-Smith (1981) 536

3.3. Analyse de l'article de Burki (2014) 542

4. DÉTAIL DE LA SÉANCE DE BIOLOGIE, AU CŒUR DE LA SÉQUENCE 547

5. DÉCOUPAGE DU DÉBAT COLLECTIF EN ÉPISODES 553

6. TRANSCRIPTION DES DEUX DÉBATS COLLECTIFS 555

6.1. Transcription du débat collectif – partie 1 555

6.2. Transcription du débat collectif– partie 2 (synthèse sur les trois classifications à visée phylogénétique) 580

7. LES CARTES CONCEPTUELLES 592

7.1. Carte du groupe A2 (Karima et Aude) 592

7.2. Carte du groupe A3 (Jonathan et Pierrik) 593

7.3. Carte du groupe A4 (Laurène et Thomas) 594

7.4. Carte du groupe A6 (Romina et Tiphaine) 595

7.5. Carte du groupe A7 (Manuella et Helena) 596

7.6. Carte du groupe A8 (Marina et Valentino) 597

7.7. carte du groupe B2 (Véronique et Evelyne) 598

7.8. Carte du groupe B3 (Marco, Max et Guy) 599

7.9. Carte du groupe B4 (Benoît et Valérie) 600

7.10. Carte du groupe B5 (Albane et John) 601

7.11. Carte du groupe B6 (Laureline et Marjo) 602

7.12. Carte du groupe B7 (Eric et Matthew) 603

7.13. Carte du groupe B8 (Caroline et Lara) 604

8. PROPOSITIONS DES TREIZE CARTES CONCEPTUELLES RELATIVES AUX TERMES DÉRIVANT DU NOYAU LEXICAL « PHYLOGEN » 605

9. ANALYSE DU DÉBAT RELATIF À LA DÉFINITION DES VÉGÉTAUX DANS L'ARTICLE DE CAVALIER-SMITH 606

10. ANALYSE DU DÉBAT RELATIF À LA DÉFINITION DES VÉGÉTAUX DANS L'ARTICLE DE BURKI (2014) 608

10.1. Débat interne au groupe 1 (phase préparatoire au débat collectif) 608

10.2. Débat collectif (épisode 23) 613

11. ANALYSE DES DIFFICULTÉS LIÉES À LA CLADISTIQUE 618

11.1. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le premier débat collectif concernant Burki 618

11.2. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le second débat collectif concernant Whittaker et Cavalier-Smith 619

12. PROPOSITIONS DES TREIZE CARTES CONCEPTUELLES RELATIVES AUX TERMES CONCERNANT L'ÉVOLUTION DES IDÉES 622

12.1. Propositions concernant les termes ou nœuds lexicaux theori/context/cadre 622

12.2. Propositions concernant les différentes méthodes de classification 624

13. TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES RELATIFS À LA CONSTRUCTION DE LA CARTE CONCEPTUELLE (GROUPE A7) 627

1. Le questionnaire

Dans le cadre d'une recherche réalisée en didactique de la biologie par Robin BOSDEVEIX (Laboratoire de Didactique André Revuz, Paris Diderot), nous nous intéressons à la manière dont les étudiants de master 2 se préparant au CAPES de sciences de la vie et de la Terre appréhendent le concept de végétal.

Les résultats serviront à alimenter la recherche en cours et resteront anonymes.
Le questionnaire comprend 4 questions.

Consignes :

- Répondez question après question et sans revenir en arrière.

- Répondez de manière individuelle et sans utiliser des ressources (cours, manuels, internet)

Temps estimé pour remplir le questionnaire : 20 à 30 minutes.

INDIQUEZ VOTRE UNIVERSITÉ :

✓ 1ère question

Définissez ce que sont les végétaux.

La longueur et le format (texte, schéma) de votre réponse sont libres mais ne dépasseront pas la taille de l'encadré ci-dessous.

✓ 2ème question

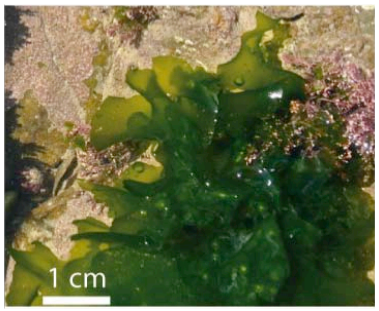
Indiquez pour chacune des treize espèces si vous pensez qu'il s'agit d'un végétal ou non.

Vous utiliserez les informations fournies (photographie et liste de caractères) ainsi que vos connaissances.

Merci d'argumenter votre réponse.

Si vous ne savez pas répondre, expliquez ce qui vous empêche de répondre.

1°) Laitue de mer, à marée basse,



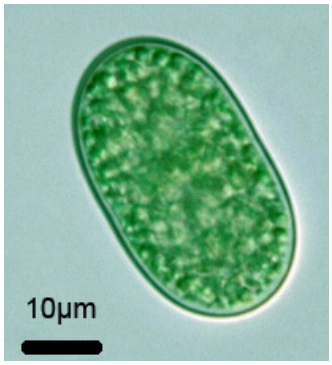
- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et pectines
- Plastes à 2 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

2°) *Synechococcus sp.* (Cyanobactérie)



- Non fixé au substrat
- Unicellulaire
- Cellule procaryote
- Paroi cellulaire : peptidoglycanes
- Pas de plastes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction n'impliquant pas de spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

3°) *Fucus serratus*, à marée basse (Straménopile)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et alginates
- Plastes à 4 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

4°) Euglène, *Euglena sp.* (Euglénobionte)

- Non fixé au substrat
- Unicellulaire
- Cellule eucaryote
- Pas de paroi cellulaire
- Plastes à 3 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction n'impliquant pas de spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

5°) Diatomée, *Surirella sp.* (Straménopile)

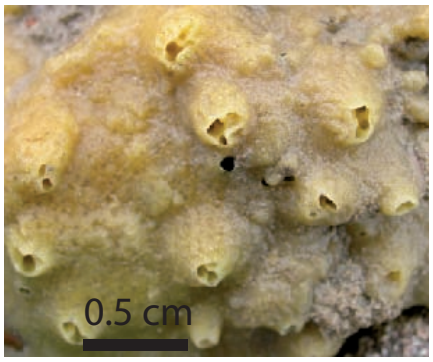
- Non fixé au substrat
- Cellule eucaryote
- Unicellulaire
- Paroi cellulaire : cellulose et silice
- Plastes à 4 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction n'impliquant pas de spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

6°) Eponge mie de pain, *Halichondria panicea* (Spongiaire)



- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Pas de paroi cellulaire
- Pas de plastes
- Pas de photosynthèse oxygénique
- Reproduction n'impliquant pas de spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

7°) *Palmaria palmata,* (Rhodobionte)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose, agar, carraghénanes
- Plastes à 2 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

8°) Andromède*, Andromeda sp.* (Angiosperme)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et pectines
- Plastes à 2 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

9°) Amanite tue-mouches, *Amanita muscaria* (Basidiomycète)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : chitine
- Pas de plastes
- Pas de photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

10°) Souris, *Mus musculus* (Mammifère)

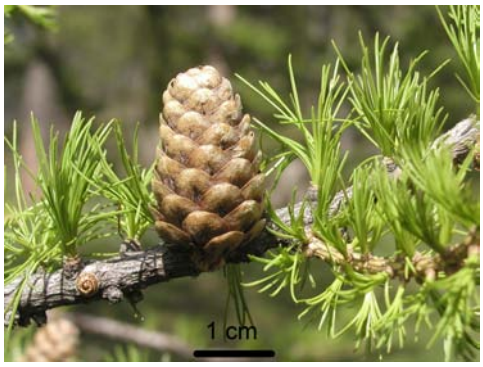
- Non fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Pas de paroi cellulaire
- Pas de plastes
- Pas de photosynthèse oxygénique
- Reproduction n'impliquant pas de spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

11°) Mélèze, *Larix decidua* (Conifère)



- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et pectines
- Plastes à 2 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

12°) Polypode commun*, Polypodium vulgare* (Fougère)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et pectines
- Plastes à 2 membranes
- Photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

13°) Orobanche*, Orobanche sp.* (Angiosperme)

- Fixé au substrat
- Pluricellulaire
- Cellule eucaryote
- Paroi cellulaire : cellulose et pectines
- Plastes à 2 membranes
- Pas de photosynthèse oxygénique
- Reproduction impliquant des spores

Est-ce un végétal ?

OUI **NON** **Je ne sais pas**

Arguments :

✓ 3ème question :

Quelle est l'importance fonctionnelle des végétaux dans les écosystèmes ?

✓ 4ème question

Les végétaux constituent-ils un groupe systématique valide (c'est-à-dire monophylétique) dans la classification phylogénétique actuelle?

Oui

Non

Je ne sais pas

Justification de votre réponse :

Nous vous remercions de votre collaboration.

2. La grille de codage

Organisation morpho-anatomique (O)	**Fixé au substrat / immobilité**	O1
	Thalle	O2
	Cormus / tige feuillée	O3
	Apparente immobilité (ou généralement fixé)	O4
	Justification "NV" sur la base de caractères (synapomorphies) de Métazoaires ou autre gpe [Ex : Yeux et bouche (Métazoaires) / ou de Vertèbres (Vertébrés) / poils (Mammifères)] *[Aurait pu être codé en S également*]	O5
Organisation cellulaire (C)	**Pluricellulaire**	C1
	Cellule eucaryote	C2
	Vacuole	C3
	Paroi	C4
	Paroi pecto-cellulosique	C5
	Plastes (ou chloroplastes ou phéoplastes...)	C6
	Cellulose	C7
	Peptidoglycane (pas de cellulose)	C7*
	Plastes à 3 ou 4 mb	C8
	Plasmodesmes	C9
	Chitine	C10
	Grande taille cellulaire	C11
	Absence de centriole	C12
	Hyphes / mycélium	C13
	Totipotence / plasticité cellulaire	C14
	Phragmoplaste	C15
Métabolisme (M)	**Photosynthèse oxygénique** (ou photosynthèse ou phototrophie)	M1
	Autotrophie (au C, à N…)	M2
	Métabolisme secondaire (phytohormones, lignine, alcaloïdes…)	M3
	Chlorophylle (ou pigment photosynthétique) (pas de codage de la précision de chl a, b, c)	M4
	Organisme non vert => dépourvu de chlorophylle	M5
	Transformation de matière minérale en matière organique	M6
	Conversion énergie lumineuse en énergie chimique	M7
	Fonction spécifique des plantes terrestres (vasculaires) (Utilisation du sol pour se nourrir/ absorption racinaire ou circulation des sèves…)	M8
	Amidon	M9
Reproduction et développement (R)	**Reproduction impliquant des spores**	R1
	Croissance continue, croissance modulaire - itérative	R2
	Méristèmes	R3

	Fleurs	R4
	Fruits – graines	R5
	Pollinisation	R6
	Reproduction asexuée (scissiparité...)	R7
	Reproduction sexuée	R8
	Méiose forme des spores / cycle non monogénétique	R9
	Anges (gamétanges, sporanges)	R10
Systématique et évolution (S)	Groupe monophylétique (ou utilisation de la notion de règne végétal)	S1
	Groupe non monophylétique	S2
	Groupe polyphylétique	S3
	Groupe paraphylétique	S4
	Endosymbiose (pas de codage de la précision : primaire ou secondaire)	S5
	Homoplasie (ou convergence) : origine multiple des plastes et de la photosynthèse	S6
	Homologie	S7
	Synapomorphie (ou apomorphie)	S8
	Perte secondaire de la photosynthèse chez les holoparasites	S9
	Végétaux verts = chlorophylliens Remplacé par M5 finalement	S10 M5
	Pas d'ancêtre commun exclusif	S11
	Limitation aux plantes terrestres par des références propres à ce groupe (tige feuillée, lignine, stomates...)	S12
	Végétaux = lignée verte (restriction explicite)	S13
	Algue	S14
	Champignon	S15
	Animal	S16
	Lignée verte	S17
	La classification change, est remise svt en cause	S18
	Explicitation de la tension entre définition systématique et fonctionnelle	S19
	Végétaux (ou plantes) supérieures - inférieures (valeurs / échelle des êtres)	S20
	Ptéridophytes	S21
	Caractéristiques mixtes animales et végétales	S22
	On retrouve des végétaux dans différentes branches de l'arbre	S23
	Partage de caractères spécifiques qui leur sont propres	S24
	Orobanche : l'exception	S25
	Cite des exemples de groupes végétaux	S26
	Végétaux non chlorophylliens	S27
	L'évolution de certaine espèces de végétaux les rapprochent des Eumycètes (ex. Rafflésie)	S28

	Rassemblement d'organismes aux caractéristiques différentes	S29
	La place de certains groupes dans l'arbre n'est pas tranchée (ex : algues rouges ou brunes…)	S30
	Thallophytes	S31
	Bicontes	S32
	Animaux photosynthétiques (via symbiotes ou cleptoplastes) : coraux, Elysia…	S33
	Plantae	S34
	Végétal type	S35
	Protistes	S36
	Certains groupes (comme les Straménopiles) contiennent des végétaux et des champignons	S37
	Chlorobiontes (Chlorophytes, Embryophytes)	S38
Ecologie (E)	Producteur primaire	E1
	Base des chaînes alimentaires / réseaux trophiques	E2
	Transformation de matière minérale en matière organique Finalement codé M6 car plus métabolique qu'écologique	E3 M6
	Rôle dans les cycles biogéochimiques (C, N...)	E4
	Entrée d'énergie dans les cycles biogéochimiques et peut se fossiliser : ressources énergétiques fossiles : charbon...	E5
	Relations interspécifiques (autre que prédation) comme la symbiose…	E6
	Participation à la formation et évolution du sol (origine importante de la MO des sols, altération de la R. mère, échanges hydro-minéraux)	E7
	Structurent les paysages / Constituent l'habitat d'autres EV / Biotopes / Biomes	E8
	Limitent l'érosion des sols, rôle mécanique	E9
	Renouvellement de l'O_2 atmosphérique; oxygénation de l'atmosphère primitive	E10
	Organismes pionniers; "sortie" des eaux	E11
	Échanges avec hydrosphère et atmosphère	E12
	Différents milieux : terrestre, aquatique	E13
	Essentiel de la biomasse	E14
	Parasitisme	E15
	Phytoplancton	E16
	Formation de roches sédimentaires (diatomites, calcaires,, stromatolithes…)	E17
	Importance dans la biodiversité dépendante des végétaux	E18
	Gestion anthropique des espaces naturels (corridors écologiques, haies de bocages...)	E19
	Cycle de l'eau (limitation du ruisselement, évapotranspiration…)	E20
	Vie en milieux "hostiles" / "extrêmes"	E21
	Défense contre les stress biotiques (prédateurs…) et abiotiques	E22

	Rôle d'épurateur (des sols, de l'air), anti-pollution, anti-réchauffement climatique (effet de serre) / action climatique	E23
	Participation à la dynamique du milieu	E24
	Plantes carnivores	E25
	Types biologiques de Raunkier	E26
Inclusion ou exclusion	Argument d'exclusion "C'est un végétal car ce n'est pas un animal" (ou l'inverse)	EX
	Argument d'inclusion "C'est un végétal car c'est une Angiosperme."	IN
	Argument d'exclusion **seul** (sans autres arguments)	EXS
	Argument d'inclusion **seul** (sans autres arguments)	INS
Utilitaire (U)	Ressource pour l'Homme	U1
Enseignement (BV)	Végétal car étudié dans l'enseignement de biologie végétale	BV
Autre	Non justifié (pas d'arguments)	NJ
	Non codé (confus ou arguments "décalés", hors-sujet…)	NC

En gras : caractères indiqués en question 2

Avec une étoile : absence du caractère correspondant. Bactérie =non eucaryote = C2*

3. Analyse des trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes (en utilisant la grille donnée aux étudiants)

3.1. Analyse de l'article de Whittaker (1969)

Pour simplifier le travail des étudiants, les deux items (justifications empiriques et théoriques des choix de classification) ont été regroupés en un seul. Par ailleurs, l'item « Résultats majeurs – conclusions principales de l'article » a été supprimé de la grille pour centrer l'analyse sur la situation-problématique motivant la séance portant sur l'évolution du groupe des végétaux dans les différentes classifications.

		CITATIONS
Objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés	•Classification mixte évolutive et écologique •Permettre de représenter les relations évolutives • Basée sur des données liées à l'organisation et aux modes de nutrition	•**Evolutionary relations** are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. (p. 150) •There are, however, not two principal modes of nutrition but three-the photosynthetic, absorptive, and ingestive. The three modes largely correspond to three major functional groupings in natural communities, the producers (plants), reducers (saprobes, that is, bacteria and fungi), and consumers (animals). (...) **The three modes of nutrition imply different logics on which the evolution of structure in higher organisms was based.** (p. 152) Neither the intergradation of these modes among protists nor specialized exceptions among higher organisms (...) should obscure **the significance of the nutritive modes in the broad evolutionary pattern of the living world**. (p. 153) I believe that this system better represents **broad relationships in regard to both levels of organization and nutritive modes affecting kinds of organization** than the two-kingdom and Copeland systems. (p. 157)
Résultats majeurs - conclusions principales de l'article	Classification taxonomique en 5 règnes basée sur trois niveaux d'organisation (procaryote, eucaryote unicellulaire et eucaryote multicellulaire-multinucléé) et trois directions d'évolution en relation avec la nutrition (photosynthèse, absorption et ingestion)	A five-kingdom system based on three levels of organization-the procaryotic (kingdom Monera), eucaryotic unicellular (kingdom Protista), and eucaryotic multicellular and multinucleate. On each level there is divergence in relation to three principal modes of nutrition - the photosynthetic, absorptive, and ingestive. (p. 157)

Que sont les végétaux dans la classification?	•Organismes pluricellulaires avec cellules dotées d'une paroi et de plastes, photosynthétiques (sauf exceptions) et primitivement fixés. Cycle primitivement digénétique haplodiplophasique •"Sur le critère de la monophylie, les végétaux sont moins un règne qu'une alliance de groupes séparés qui sont multicellulaires et principalement photosynthétiques."	**Multicellular organisms with walled** and frequently vacuolate **eucaryotic cells and with photosynthetic pigments in plastids** (together with closely related organisms which lack the pigments or are unicellular or syncytial). **Principal nutritive mode photosynthesis**, but a number of lines have become absorptive. **Primarily nonmotile, living anchored to a substrate**. Structural differentiation leading toward organs of photosynthesis, anchorage, and support, and in higher forms toward specialized photosynthetic, vascular, and covering tissues. Reproduction primarily sexual with **cycles of alternating haploid and diploid generations,** the former being progressively reduced toward the higher members of the kingdom. (p. 154) •Judged by the criterion of monophyly, the Plantae as treated here may seem **less a kingdom than an alliance of separate groups which are multicellular and predominantly photosynthetic**.(p. 157)
Euglène végétale dans la classification?	Non car eucaryote unicellulaire (Protista)	
Diatomée végétale dans la classification?	Non car eucaryote unicellulaire (Protista)	
Opposition à certaines positions énoncées par d'autres chercheurs Eléments de controverse scientifique	•Rejet de la classification traditionnelle à deux règnes •Critique du système de Copeland à 4 règnes : problème de la place des Fungi, problème d'unité et de clarté de définition des Protoctista	•The plant and animal kingdoms are products of, a process of concretion, by which groups of organisms which were aquatic, or fungal, or microscopie, or more than one of these, were added **around the nuclear concepts of plant and animal derived from higher land organisms**.It was recognized that the two kingdom system came into difficulties in treatmentof **the unicellular organisms**, since some groups of these were claimed both for the plant kingdom by botanists and for the animal kingdom by zoologists. (p. 150) •The third, absorption as the nutritive theme of the higher fungi, is not given coordinate recognition; and the place of these organisms in the broad evolutionary pattern of the living world is not clarified. (p. 153) •An uneasy boundary between protoctists and higher organisms results. The kingdom Protoctista lacks the unity and clarity of definition which the system achieves for the other three kingdoms. (p. 154)

Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre théorique (Idées mobilisées)	•Idée de forme de transition / intermédiaires •Idée de direction / tendance évolutive •Idée de hiérarchie (lower, higher groups; "levels of structural complexity among animals") •Impossibilité de classer les unicellulaires entre végétaux et animaux •Discussion sur l'extension des Protistes et restriction aux organismes unicellulaires ou coloniaux, sans tissus •Séparation la plus importante entre eucaryotes et procaryotes [bactéries+algues bleues-vertes], première division du vivant (avant les différences de nutrition) •Endosymbiose à l'origine des plastes et des mitochondries (hypothèse) •Les trois modes de nutrition (et trois rôles écologiques dans les communautés) " correspondent à des logiques sur lesquelles l'évolution des structures est basée" •Tendances évolutives chez les végétaux réalisées à différents degrés dans différentes lignées évolutives indépendantes •Trois mêmes modes de nutrition acquis nécessairement chez les unicellulaires •Une classification doit être claire / cohérente (critique du groupe des Protoctista (Copeland) dont la limite est basée sur la différenciation tissulaire pose un problème : cf algues brunes) •Homologie / monophylie mobilisée mais n'ayant pas une valeur absolue et ne devant pas être suivie absolument face aux autres critères	•In a number of cases plant-like and animal-like unicells were connected by a series of closely related **intergrading forms** within the same major taxon. (p. 150) Because of the impossibility of clear division of the unicells into plants and animals, a number of authors suggested third kingdoms of lower organisms (p. 150) •The kingdom Protista comprises organisms which are unicellular or unicellular--colonial and which form no tissues. (p. 151) •These contrasts between the procaryotic cells of bacteria and blue-green algae, and the eucaryotic cells of other organisms, define **the clearest, most effectively discontinuous separation of levels of organization in the living world.** (p. 151) •The bacteria are not plants in either way of life or evolutionary relation to other plants; and the blue-green algae, which are functional plants, are **widely separated in their cell organization** from ail other plants. (p. 151). •Neither the intergradation of these modes among protists nor specialized exceptions among higher organisms plants which catch insects or micro crustaceans, fungi which trap nema todes, animals and plants which feed as absorptive parasites, and the symbiotic relations of lichens, corals, and so forth - should obscure the **significance of the nutritive modes in the broad evolutionary pattern of the living world.** •The direction as stated has been realized to **different degrees in a number of independent evolutionary lines** of plants including higher green algae, red algae, brown algae, mosses, and vascular plants. (p. 152) •The **same nutritive' modes necessarily appear among the unicells**. (p. 153)

Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre empirique (Données mobilisées : observation, expérimentation…)	•Des eucaryotes unicellulaires ont des caractères mixtes (d'animaux et de végétaux) comme *Euglena* •Différences biochimiques et structurales importantes entre bactéries et eucaryotes •Structure des champignons différente de celles des végétaux (non homologue)	•The most obvious difficulty is that for which we use **Euglena** and its relatives as. the exemplar for students -the **intergrading combinations of plant and animal characters,** the fusion of the kingdoms, among unicellular organisms. (p. 150) •Sorne forms were motile and ingested food, however, and were naturally re garded as one-celled animals or protozoans. Others were nonmotile and photosynthetic, hence one-celled plants. (…) There remained a wide range of unicellular forms in which nonmotility and flagellate or pseudopodial motility, and ingestive, photosynthetic, and absorptive nutrition, **were combined in various ways which were neither clearly plant like nor animal-like.** (p. 150)
Usage de l'homologie dans la classification	**•Homologie mobilisée mais n'ayant pas une valeur absolue et ne devant pas être suivie absolument face aux autres critères** •Homologie évoquée pour l'organisation des champignons différente des plantes (mycélium). Convergence entre struct végétatives te reproductrices d'algues et de champignons •Convergences entre les différentes lignées d'algues (ancêtres unicellulaires différents) •Mais homologie non nécessaire pour établir les règnes	•Their organization [Fungi] is very different from, and **nonhomologous** with, that of the plants. (...) It is probable that only **convergences** relate the structures and life cycles of the fungi to the algae on the one hand, and to the mycelial bacteria (actinomycetes) on the other. (p. 152) **•Monophyly is a principal value of systematics (68, 69), but like other values is not absolute and will not always be followed to the sacrifice of other objectives. I** have chosen to base classification on three' levels of organization - the procaryotic, eucatyotic unicellular, and multicellular-multinucleate and three principal directions of evolution related to nutrition, which on the multicellular-multinucleate level are expressed in the evolutionary divergences of the three higher kingdoms. **The three higher kingdoms are polyphyletic in parallel fashions.** Each includes a dominant evolutionary line to higher organisms as its major subkingdom, and minor subkingdoms which are independent experiments in multicellular or multinucleate organization in one of the three nutritive directions. (p. 158)

Méthodologie : quelle méthode de classification est utilisée?	•Pas de méthode clairement explicitée. "Plusieurs choix pour séparer les organismes inférieurs et supérieurs" Recherche d'un "système cohérent avec des caractères facilement définissables pour les règnes" Le schéma (arbre) ne confond pas filiation / phylogénie, mais admet des groupes paraphylétiques et polyphylétiques •Gros problème car accepte des groupes reconnus commes polyphylétiques. Bien que cherchant à retracer l'histoire évolutive, les "higher kingdoms" sont polyphylétiques.... Monophylie n'est pas le seul facteur à prendre en compte.	•In fairness these points should be recognized to reflect not so much faults of the Copeland system as faults of the living world as a subject of classification. **There is no good way to separate the lower and higher eucaryotic organisms, there are only different choices with different difficulties.** Given level of tissue differentiation as the choice, the assignment of the higher fungi and algae to the kingdom Protoctista and the heterogeneity of the kingdom will follow. The difficulties cannot be overlooked, but they should not prevent recognition that this is a reasonable and workable broad classification of the living world, with marked advantage over the two-kingdom system in its grouping of phyla by levels of organiza tion. Copeland's is a major contribution to interpretation of the living world. (pp. 154-155) •I believe that this system better rep resents broad relationships in regard to both levels of organization and nutritive modes affecting kinds of organization than the two-kingdom and Copeland systems. The red and brown algae and the fungi may seem better placed, the former as the higher plants of the sea, the latter as the third major evolutionary ,direction among higher organisms. The system may further have much advantage over the two-kingdom system and some over the Copeland system **in the coherence and definable character of the kingdoms as units of classification.** **•The three higher kingdoms are polyphyletic.** Phaeophyta are recognized to have come from different unicellular ances tors than the Chlorophyta; the resemblance of these three groups as higher plants results from convergence. (p. 157) **Monophyly is a principal value of systematics** (68, 69), **but like other values is not absolute and will not always be followed to the sacrifice of other objectives.** I have chosen to base classification on three' levels of organization - the procaryotic, eucatyotic unicellular, and multicellular-multinucleate and three principal directions of evolution related to nutrition, which on the multicellular-multinucleate level are ex pressed in the evolutionary divergences of the three higher kingdoms. The three higher kingdoms are polyphyletic in parallel fashions. Each includes a dominant evolutionary line to higher organisms as its major subkingdom, and minor subkingdoms which are independent experiments in multicellular or multinucleate organization in one of the three nutritive directions. (p. 158)

3.2. Analyse de l'article de Cavalier-Smith (1981)

		CITATIONS
Objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés	Classification phylogénétique basée sur des données de structure cellulaire	The primary taxa of eukaryote classification should be monophyletic and based on fundamental cell structure rather than nutritional adaptive zones. (p. 461)
Résultats majeurs - conclusions principales de l'article	9 règnes eucaryotiques, pouvant être réduits à 7 par regroupement de deux paires (deux groupes rassemblés en Fungi et deux groupes en Chromista) et même 5 groupes en réunissant aussi les Biliphyta et Viridiplantae au sein des Plantae et Protozoa et Euglenozoa dans les Protista.	•Eukaryotes can be classified into nine kingdoms each defined in terms of a unique constelation of cell structures. (p. 461) A simpler system of five kingdoms suitable for very elementary teaching is possible by grouping the photosynthetic and fungal kingdoms in pairs. Various compromises are possible between the nine and five kingdom systems; it is suggested that the best one for general scientific use is a system of seven kingdoms in which the Eufungi and Ciliofungi become subkingdoms of the Kingdom Fungi, and the Cryptophyta and Chromophyta subkingdoms of the Kingdom Chromista. (p. 461) •I prefer the **seven-kingdom system** and advocate its widespread adoption for general scientific use because I believe that the Chromista and Fungi are monophyletic units and wish to minimize the number of kingdoms. (p. 478)
Que sont les végétaux dans la classification?	Organismes eucaryotes largement photosynthétiques ne formant pas un groupe monophylétique mais formant 4 règnes séparés : Biliphyta, Viridiplanta (formant les Plantae); Cryptophyta, Chromophyta (formant les Chromista). [Euglenophyta et Dinophyta, exclus car partagent des caractères avec les Protozoa]	Though the removal of the fungi (in the broad sense) from the classical plant kingdom leaves behind a **more homogeneous** group that is largely photosynthetic, comparative ultrastructural and biochemical studies indicate that this photosynthetic residue is not a monophyletic unit that can be clearly distinguished from non-photosynthetic unicellular phagotrophs. However, if the Euglenophyta and Dinophyta are set aside as basically "protozoan" groups (cf. Round, 1980), because of their frequent phagotrophy and clear relationship with other protozoa, the remaining photosynthetic eukaryotes fall clearly into four groups each of which is arguably monophyletic, and which can be treated as four separate plant kingdoms: the Viridiplantae, the Biliphyta, the Cryptophyta, and the Chromophyta.(p. 466)
Euglène végétale dans la classification?	Non. Euglenozoa, un des 9 règnes eucaryotes pouvant être regroupés dans les Protista.	However, if the Euglenophyta and Dinophyta are set aside as basically "protozoan" groups (cf. Round, 1980), because of their frequent phagotrophy and clear relationship with other protozoa, the remain- ing photosynthetic eukaryotes fall clearly into four groups each of which is arguably monophyletic, and which can be treated as four separate plant kingdoms: the Viridiplantae, the

		Biliphyta, the Cryptophyta, and the Chromophyta. (p. 466) •Their mitochondrial cristae, shaped like a flattened disc with a narrow neck, clearly distinguish them from the Viridiplantae which resemble them in plastid structure but have normal plate-like cristae and from the Protozoa some of which (notably the Dinozoa) have similar flagellar structure but which have tubular cristae. (p. 468)
Diatomée végétale dans la classification?	Oui car appartient aux Chromophyta, l'un des 4 règnes végétaux	
Opposition à certaines positions énoncées par d'autres chercheurs **Éléments de controverse scientifique**	Critique de la classification traditionnelle à 2 règnes et de la classification des Eucaryotes en 4 règnes (Whittaker)	•the division into the classical animal and plant kingdoms as the primary eukaryote divisions (Dodson, 1971; Round, 1980) and the alternative and widely used four kingdom eukaryote classifications (Whittaker, 1969, 1977; Margulis, 1974a,b; Whittaker and Margulis, 1978) are both unsatisfactory from a fundamental biological viewpoint. (p. 462) •It has been clear for 120 years that the classical division of the living world into just two kingdoms, Animalia and Plantae, is unsatisfactory when **microorganisms are taken into account**, for the classical criteria for defining animals and plants then break down. (p. 471) •Whittaker and Margulis (1978) recognise that their system embodies highly polyphyletic kingdoms. This is inevitable if taxonomic definitions are based on vague nutritional, ecological and organisational considerations, rather than on the precise structure of the organisms in ques- tion which is the usual practice in taxonomy. (p. 470)

Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre théorique (Idées mobilisées)	•Rejet de la classification fondée sur les modes de nutrition car il conduit à des groupes polyphylétiques. •Grande importance des caractères cellulaires pour classer les eucaryotes par extension de ce qui est pratiqué pour les procaryotes. •Endosymbiose multiple à l'origine des plastes	The use of nutritional adaptive zones as the basic criterion (Whittaker, 1969, 1977) leads to a system where kingdoms are polyphyletic and organisms are not grouped together on the basis of relatedness, which is contrary to the established principles of taxonomy. (p.462) If we are to separate prokaryotes from eukaryotes on the basis of fundamental cell structure we should do the same for the primary subdivisions of these two groups. (pp. 462-463) A major feature of the present classification is that it gives great taxonomic weight to the structure of mitochondrial cristae (Leadbetter and Manton, 1974; Hibberd, 1975; Taylor, 1976, 1978} which was ignored in my earlier classification (Cavalier-Smith, 1978). (pp. 464-465). •Though the names chosen for the four plant kingdoms refer to their plastid pigments, it is important to emphasise, in view of the possibility that **plastids have arisen several times by endosymbiosis** (Margulis, 1970; Stanier, 1974; Phillipsand Carl 1977; Gibbs, 1981; Cavalier-Smith, 1981a), that ciliary and mitochondrial characters also point to the monophyly and distinctness of each of the four groups. (p. 467) •Therefore, I earlier attempted to group taxa into smaller number of eukaryotic kingdoms (Cavalier- Smith, 1978); that system, however, was unsatisfactory because it ignored **the structure of mitochondrial cristae,which several authors have suggested is of major taxonomic significance** (Taylor, 1978). •**Electron microscopy** has provided the basic structural data on which the present multikingdom classification is based. The chemistry of photosynthetic pigments, storage carbohydrates, cell walls, and of lysine synthesis has provided valuable additional information that largely confirms the ultrastructural data.
Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre empirique (Données mobilisées : observation, expérimentation…)	•Importance de la microscopie électronique •Structure des crêtes mitochondriales, nombre et la position des flagelles (nommés cils), le type de plastes (nombre de mb, organisation des tylacoïdes, présence d'amidon...), le types de pigments photosynthétiques et autres données biochimiques (synthèse de lysine)	•Electron microscopy has now shown not only that prokaryotes must be strongly divided from eukaryotes in any large scale classification, but also that neither the classical 2 kingdoms, nor modifications embodying Copeland's concept of the Protista or Protoctista, accurately represents the cellular diversity of eukaryotes. (p. 470) •A further difference between the Animalia, as thus defined,and the Protozoa (presentsense) is that in the Animalia the unicellular ciliated stage (usually a sperm) has one or two posterior cilia, whereas in those Protozoa where only one or two cilia are present they are anterior, as in the Chromophyta (Cavalier-Smith, 1981b). (pp. 465-466)

Usage de l'homologie dans la classification	Non explicite. Parle d'homogénéité ou de similarité	There seems littledoubt that the Cryptophyta, Chromophyta, and Viridiplantae **are monophyletic, because they are very homogenous in their basic cell structure.** This is less clear at present for the Biliphyta. (pp. 467-468) [Plusieurs autres utiolisations d'homogeneous ou heterogenous] The major difference between the Rhodophyceae and the Glaucophyceae is the absence of cilia in the former. But this difference is not enough to justify separation into separate kingdoms or even phyla, as they have **very similar plastid characters(**Kies,1979) and cytoplasmic starch synthesis,and one glaucophyte (Glaucosphaera)is also non-ciliated (Kies, 1980), which is why I have taken the novel step of including them in the single phylum Biliphyta. (p. 468)

Méthodologie **Quelle méthode est utilisée pour construire la classification?**	•Détermination de groupes monophylétiques (sl). •Une classification doit être "univoque" (un groupe ne peut être que dans un seul règne) •Un groupe doit être homogène. •Un groupe doit être défini sur une description précision et non une description vague. •Pas d'approche cladistique polarisant les caractères. •Pas de justification de la pertinence des caractères utilisés (crêtes mitochondriales, ciliature, plastes, pigments). •Primauté donnée à certains caractères => Problème du choix et de la subordination des caractères. •Une classification doit permettre de nommer facilement les espèces : branche de la taxonomie. Dimension "pratique" à ne pas négliger pouvant justifier certains choix •Une classification doit comprendre un nombre raisonnable / limité de groupes (aspect pratique?) •Une classification a un pouvoir prédictif •Discussion relative à trois théories concernant l'origine de la cellule eucaryote et les scénarios évolutifs / phylogénies associés. Mais sans réflexion sur la polarité / groupe externe. •Elimination des convergences et minimisation du nombre d'évènements (parcimonie / rasoir d'Occam) •Prise en compte souhaitable de données moléculaires •Prise en compte de données structurales et pas	•There seems littledoubt that the Cryptophyta, Chromophyta, and Viridiplantae are **monophyletic,** because they are very **homogenous in their basic cell structure.** This is less clear at present for the Biliphyta. The major difference between the Rhodophyceae and the Glaucophyceae is the absence of cilia in the former. But this difference is not enough to justify separation into separate kingdoms or even phyla, as they have very similarplastidcharacters (Kies,1979) and cytoplasmic starch synthesis,and one glaucophyte (Glaucosphaera) is also non-ciliated (Kies, 1980), which is why I have taken the novel step of including them in the single phylum Biliphyta. (pp. 467-468) •The fact that many groups could equally well be in any of two or three of their kingdoms indicates the unsatisfactory nature of that type of classification. Many authors have previously criticised the **arbitrariness** of the Protista and/or Protoctista as a formal taxon (p. 470) •Jeffrey's five- kingdom and Edwards' seven-kingdom system however both contain **taxa that seem heterogeneous when the characters used in the present classification are considered**: they both include Euglenids with the green plants, chytrids with the Eufungi, dinoflagellates and cryptophytes with the Chromophyta, and Protozoa with the Animalia. (p. 471) •Whittaker and Margulis (1978) recognise that their system embodies highly polyphyletic kingdoms. This is inevitable if taxonomic definitions are based **on vague nutritional, ecological and organisational considerations**, rather than on the **precise structure of the organisms in question which is the usual practice in taxonomy**. (p. 470) •**Giving due weight to mitochondrial characters, and to the posterior ciliation** of the Ciliofungi and Animalia, made it essential to separate the Protozoa, Ciliofungi, and Animalia into separate king- doms. (p. 471) •It might be argued that the presence of tubular cristae in both the Protozoa and the Chromophyta, and the **occurrence of phagotrophy and amoeboid motion in both group**s (elsewhere present only in the Animalia), is sufficient for them to be merged still further into a single kingdom. However, the absence of both **ciliary tubular mastigonemes and plastid ER in the protozo**a and their much greater development of phagotrophy and amoeboid motion can justify their separation. (p. 471) •In addition, there is the **practical advantage that one can apply the rules of zoological nomenclature exclusively to the Protozoa and of botanical nomenclature exclusively to the Chromophyta,** thus minimising the need to change names and eliminating the confusing coexistence of two names for the

	de comportement ou de grades d'organisation	same taxon. (p. 471) •Therefore, I earlierattempted to group taxaintoasmaller number of eukaryotic kingdoms (Cavalier- Smith, 1978). (...) Because there are only 28 non-Metazoan eukaryote phyla in the present system, rather than 39 as in the Whittaker-Margulis one, it is a rather simpler overall classification. (p. 471) •The **gain in predictive power** of a system of nine monophyletic kingdoms over one of four polyphyletic ones will I hope encourage its further testing and refinement (p. 471) •These and other similarities among the three phylogenies arise because they have been constructed on the same principles: **placing structurally related organisms as close as possible to each other, eliminating the independent origin of complex characters, and minimising the number of symbiotic events or losses of major characters**. (pp. 472-473) •I prefer the seven-kingdom system and advocate its widespread adoption for general scientific use because I believe that the Chromista and Fungi are monophyletic units and wish **to minimize the number of kingdoms.** (p. 478) •the use of **Occam's razor** means that Fig. 1 is a better working hypothesis than either Fig. 2 or Fig. 3 for unravelling eukaryote phylogeny. (p. 475) •It seems clear that future tests of the classification, on which further improvements may be based, will have to be at the molecular level. The vast bull of existing comparative biochemical data on microrganlsms (Ragan and Chapman, 1978) is too superficial to be of taxonomic value. What is needed is more pri- mary sequence data of macromolecules that evolve only relatively slowly, such as rRNA, cytochromes, histones, actin, tubulin, and calcium-binding proteins. (p. 475) • It is a basic principle of taxonomy that one groups organisms together on **the basis of common fundamental structures,** not on the basis of behaviour, or grades of organisation. Lumping together all animals that swim as "fish" or that fly as "birds", or all animals lacking a backbone as invertebrates, has long been realised to be unnatural. Existing systems of kingdoms based on nutrition and/or motility, or the absence of tissue differentiation, are increasingly recognised as equally unnatural. (p. 478)

3.3. Analyse de l'article de Burki (2014)

		CITATIONS
Objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés	•Classification phylogénétique utilisant des données moléculaires, phylogénomiques •Permettre d'inférer l'histoire évolutive de caractères	•Reconstruct evolutionary histories (p. 1) •A **fully resolved phylogenetic tree** including all organisms is not only the ultimate goal of systematics, it would also provide the foundation to **infer the acquisition and evolution of countless characters through the history of long-dead species** (p. 2)
Résultats majeurs - conclusions principales de l'article	La phylogénomique est une méthode puissante utilisant une grande quantité de séquences. Certains super-groupes ont été confirmés, plusieurs ont été remaniés. Le super-groupe SAR (Straménopiles, Alvéolates, Rhizarias) a été mis en évidence. 5 super-groupes et plusieurs lignées orphelines (dont la place n'est pas encore élucidée) sont distingués : Archaeplastida (Plantae), SAR, Opistokhonts, Amoebozoa, Excavates. Remise en cause du scénario sur l'origine seondaire unique du plaste rouge	•This approach has led to the resolution of ancient and contentious relationships, notably between the building blocks of the tree (the supergroups) (p. 1) •Over the last 10 years, phylogenomics has led to important refinements of the global tree of eukaryotes. Most of the large building blocks of the tree (the supergroups) predating the genomic era have been reinforced by the analyses of larger data sets, but some were also shuffled into different arrangements (p. 11) •This vast assemblage is the most recently recognized supergroup and, contrary to the other supergroups, its existence is exclusively supported by molecular data (i.e., phylogenomic analyses (Burki *et al.* 2007, 2008; Hackett *et al.* 2007; Rodriguez-Ezpeleta *et al.* 2007a) and a derived RAB1 paralog (Elias *et al.* 2009). (p. 7) •Altogether, these observations have forged the basis for alternative scenarios to the chromalveolate hypothesis: scenarios in which red plastids spread across the tree not by means of vertical inheritance, but through more complex serial eukaryote-to-eukaryote endosymbioses (Lane and Archibald 2008; Sanchez Puerta and Delwiche 2008; Archibald 2009; Bodyl *et al.* 2009; Baurain *et al.* 2010; Dorrell and Smith 2011). (p.9) •In phylogenetic terms, one condition of the chromalveolate hypothesis is that both the plastid and host (i.e., nuclear) trees must be consistent in showing the monophyly of alveolates, stramenopiles, haptophytes, and cryptomonads. •Furthermore, a study evaluating the phylogenomic signal across the three genomic compartments (nuclear, plastid, and mitochondrial) in chromalveolate taxa reported discrepancies too high to be explained by a common origin of both the plastid and host lineages (Baurain *et al.* 2010) (p. 9)

Que sont les végétaux dans la classification?	Plus de groupe des végétaux dans l'arbre des Eucaryotes. Les organismes photosynthétiques sont dispersés au sein de plusieurs super-groupes. Le groupe Archaeplastida est également nommé Plantae (nom historique des végétaux).	Plantae = Archaeplastida (Glaucophytes, Rhodophytes, Viridiplantae) Autres groupes comprenant des organismes photosynthétiques : SAR, Excavates and several “orphan” lineages (Haptophytes, Cryptophytes)
Euglène végétale dans la classification?	La question ne se pose plus vraiment car il n'y a plus de groupe des végétaux Appartient aux Euglenids - Excavates.	A group including lineages with plastids of green algal origin, the euglenids (e.g., Euglena), also belongs to this assemblage. (p. 5)
Diatomée végétale dans la classification?	La question ne se pose plus vraiment car il n'y a plus de groupe des végétaux. Appartient aux Straménopiles - SAR.	
Opposition à certaines positions énoncées par d'autres chercheurs **Eléments de controverse scientifique**	•Remise en cause de la paraphylie des protistes •Remise en cause de leur caractère d'ancêtre	•This is not to say that biologist ignored protists, and they have been in fact recognized as a kingdom for more that a century (Haeckel 1866), but **protists were considered to be "simple" organisms from which more elaborate, multicellular species emerged**. Although these early proposals succeeded in recognizing several major assemblages, such as animals and plants, they were less successful in resolving the relationships between the groups and, with the benefit of hindsight, **failed to account for the fundamental paraphyletic and complex nature of the protist lines**. (p. 2)

Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre théorique (Idées mobilisées)	•Etude de la morphologie et des modes de nutrition inéopérante face à des microorganismes •Importance du grand nombre de séquences, de taxa et de l'amélioration des méthodes phylogénétiques • Domination des lignées unicellulaires •Remplacement de l'utilisation de règnes par des super groupes •La phylogénomique a remis en cause certains des 6 super groupes mis en évidence dans les années 2000 (Opisthokonta, Amoebozoa, Excavata, Archaeplastida, Rhizaria et Chromalveolata) •Importance de polariser l'arbre, placer la racine •Endosymbioses multiples associés à des transferts horizontaux de gènes •Etude de la cohérence phylogénétique entre données nucléaires et plastidiales	•But early attempts to resolve the eukaryotic tree, most of which were based on comparisons of **morphology and nutrition modes**, faced the impossible challenge of describing in an evolutionary sensitive way a world in which most of the diversity occurs among tiny microbes. (p. 2) •Ultimately, **new genes, more taxa, and better phylogenetic methods** showed that if the archezoan taxa appeared to diverge early, it was not because they were "primitive" eukaryotes but rather because of their artificial attraction to the base of the tree by distant outgroups (Embley and Hirt 1998; Roger 1999; Baldauf *et al.* 2000; Philippe *et al.* 2000a,b). (p. 3) •Stochastic errors arise when the number of positions in an alignment is small meaning that the random background noise, which inevitably accumulates through time because of homoplasy, will have a neutralizing effect on the positions that contain the genuine phylogenetic signal. (p. 4) •Single-gene phylogenies, **because of the limited information they contain,** are especially susceptible to stochastic errors; to counter this, the obvious solution is to **gather more data** in the hope that enough phylogenetic signal is recovered (i.e., synapomorphy will dominate homoplasy). •In this framework, animals occupy just one branch among hundreds, and are far outnumbered at the level of major lineages by unicellular eukaryotes. (p.3) •The integration of these various kinds of data led to the conception that most, if not all, eukaryotic diversity can be assigned to one of several **major assemblages, called "supergroups"** (Baldauf 2003; Keeling 2004; Simpson and Roger 2004; Adl *et al.* 2005; Keeling *et al.* 2005; Parfrey *et al.* 2006). (p. 3) •Yet, the key advantage of phylogenomics is precisely that more data is available to start with, making it possible to apply strategies to diminish the known sources of systematic errors while still maintaining most of the phylogenetic signal (see Delsuc *et al.* 2005; Philippe *et al.* 2005, 2011 for reviews). Thus, when combined with other options developed and tested on smaller data sets to increase the phylogenetic accuracy, such as the use of more accurate phylogenetic methods or better taxon samplings, **phylogenomics becomes a very powerful tool.** (p. 4) •**The validity of this assemblage** [Unikonts]**, however, relies on the position of the eukaryotic root**, which remains hypothetical (p. 5) •Importantly, the pervasiveness of HGT [Horizontal Gene Transfert] in eukaryotes, in particular, the genes transferred from plastids (endosymbiotic gene transfer), will need to be systematically evaluated. Presently, the fierce debate over the global impact of HGT on eukaryote evolution and its harmful

		consequences on phylogenomics is far from a consensus (p. 11) •Before being members of SAR, stramenopiles and alveolates were part of another supergroup, chromalveolates, which has played a central role in shaping our understanding of eukaryotic evolution, particularly **the origin and spread of secondary plastids of red algal origin** (Keeling 2009). (p. 7) •This supergroup [Archaeplastida] is composed of the three main lineages of primary photosynthetic taxa: organisms that harbor **plastids directly derived from the cyanobacterial endosymbiosis**. (p. 6) •Altogether, these observations have forged the basis for alternative scenarios to the chromalveolate hypothesis: scenarios in which red plastids spread across the tree not by means of vertical inheritance, but through **more complex serial eukaryote-to-eukaryote endosymbioses** (Lane and Archibald 2008; Sanchez Puerta and Delwiche 2008; Archibald 2009; Bodyl *et al.* 2009; Baurain *et al.* 2010; Dorrell and Smith 2011). (p.9) •In phylogenetic terms, one condition of the chromalveolate hypothesis is that both the plastid and host (i.e., nuclear) trees must be consistent in showing the monophyly of alveolates, stramenopiles, haptophytes, and cryptomonads. •Furthermore, a study evaluating the phylogenomic signal across the three genomic compartments (nuclear, plastid, and mitochondrial) in chromalveolate taxa reported discrepancies too high to be explained by a common origin of both the plastid and host lineages (Baurain *et al.* 2010) (p. 9)
Argumentation : justifications des choix de classification d'ordre empirique (Données mobilisées : observation, expérimentation…)	•Etude de séquences moléculaires •Etude de rRNA puis autres facteurs moléculaires (facteurs d'élongation, ARN polymérase, insertions, délétions, actin-æ etß-tubulins, translation elongation factor 2 (TEF2)...), en plus de données structurales (MO, MET) •Mise en place de la génomique permettant le développement de la phylogénomique •Développement de nouvelles techniques de séquençage à partir de nano-quantités de matériel biologique •Approche intégrative mêlant plusieurs	•With the advent of genomics, a new discipline of phylogenetics has emerged: phylogenomics. This method uses large alignments of tens to hundreds of genes to reconstruct evolutionary histories. (p. 1) •Comparing nucleotide or amino acid sequences is now the tool of choice for reconstructing evolutionary histories. This is particularly true for protists because the interpretation of their morphological characters alone is problematic. (p.2) •small subunit ribosomal RNA (SSU rRNA) (p. 2) various elongations factors and RNA polymerase subunits (p. 2) •More generally, the whole eukaryotic tree was shaken up by important discrepancies between **SSU rRNA-based phylogenies** and those inferred from **a growing number of protein-coding genes, as well as discrete molecular characters such as shared indels (insertion/deletions) or gene fusions, or the systematic analysis of light and electron microscopy data** (e.g., Baldauf and Palmer 1993; Keeling and Doolittle 1996; Fast *et al.* 1999; Baldauf *et al.* 2000;

	approches •Importance évolutive des transferts horizontaux de gènes (liés à l'endosymbiose notamment)	Moreira *et al.* 2000; Cavalier-Smith 2002; Simpson 2003; Nikolaev *et al.* 2004; Harper *et al.* 2005). (p. 3) •As of 2012, at least **one species from each major lineage of eukaryotes has had its genome fully sequenced**, not to mention the numerous smaller scale genomic surveys and transcriptomic data sets that have been generated. (p. 4) •Technological advancements such as sequencing preparation from nano-quantities of material now allow one to tackle these taxa from a genomic perspective, even when cell cultures cannot be established (Yoon *et al.* 2011). (p. 11) •Resolving the tree of eukaryotes will necessitate continuing the integrative approach blending morphology, single-gene phylogeny, and phylogenomics including all diversity. (p. 11)
Place / usage de l'homologie dans la classification	2 usages explicites de synapomorphies (homologie à l'état dérivé)	•to counter this, the obvious solution is to gather more data in the hope that enough phylogenetic signal is recovered (i.e., synapomorphy will dominate homoplasy). (p. 4) •The cortical alveoli, a system of vesicles supporting the plasma membrane, constitute a morphological synapomorphy for the alveolates (Cavalier-Smith 1991). (p. 7)
Méthodologie : quelle méthode de classification est utilisée?	Méthode phylogénomique Dérivée de la cladistique Distinction entre mono et paraphylétique Usage des synapomorphies Importance de l'enracinement de l'arbre, de la polarisation	•Although these early proposals succeeded in recognizing several major assemblages, such as animals and plants, they were less successful in resolving the relation- ships between the groups and, with the benefit of hindsight, failed to account for the fundamental paraphyletic and complex nature of the protist lines. (p. 2) •Animals emerged from within a paraphyletic assemblage of protists, (…) (p. 4) •Synapomorphy : cf ligne ci-dessus •**Clades** : utilisés 5 fois. Exemple : At the other end of the tree, the so-called crown, contain the major clades of eukaryotes, appearing tightly bunched together as if they diverged almost simultaneously (Sogin 1991; Knoll 1992). (p. 2) •Root : nombreuses références dont : In addition to improving the resolution of the eukaryotic tree, **knowing precisely where the root lies is essential to give directionality to evolution** and go beyond the classical star-like representation of the supergroups. (p. 9)

4. Détail de la séance de biologie, au cœur de la séquence

Dates : lundi 8 décembre 2014 (M1 MEEF SVT)

Durée : 4h

Organisation de la séance de TD (en demi-groupe de 15 étudiants)

1. Introduction et lancement de la première partie : 15 min
2. Présentation croisée des articles en petit groupe de travail et remplissage individuel de la grille de comparaison (préparation du débat collectif) : 1h15
3. Pause : 15 min
4. Débat collectif sur les quatre articles : 1h15
5. Bilan sur l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux dans le cadre de classification phylogénétique : 1h
    a. Travail par petit groupe (les mêmes groupes que lors de la 1ère phase), remplissage individuel de la seconde grille : 30 min
    b. Mise en commun, second débat collectif : 30 min

---

1. Introduction et lancement de la première partie de la séance (15 min)

Rappel de la situation-problème énoncée et distribuée lors de la séance précédente.

> « Nous cherchons à montrer qu'il n'existe pas une unique manière de définir les végétaux, grâce à un travail basé sur l'analyse d'articles scientifiques.
>
> Nous cherchons à :
>
> - caractériser les différentes conceptions des végétaux selon les problèmes travaillés
>
> - et à montrer comment a évolué le groupe des végétaux dans les différentes classifications biologiques et quelles sont les raisons de ces changements.
>
> Pour répondre aux questions posées, nous travaillons sur quatre textes. Vous avez tous lu en commun l'un des quatre textes, à savoir les deux extraits de Gasparini (2014) et Sabine (2014) (une feuille RV), correspondant à une certaine conception des végétaux. Les trois autres articles systématiques ont été répartis entre vous. Vous allez travailler en trois groupes mixtes de 4 à 6 étudiants pendant la première partie de la séance. Pendant une heure : vous devez tout d'abord vous mettre d'accord sur l'analyse du texte court lu en commun puis vous présenter tour à tour l'article que vous avez lu. Les personnes n'ayant pas lu un article doivent questionner leurs collègues afin de bien comprendre la position de l'auteur, la logique argumentative. Vous disposez d'environ 15min par article.

Puis vous disposerez de 15 minutes pour faire une synthèse individuelle des échanges concernant les 4 articles en remplissant le tableau vierge [que l'on vous distribuera]. Vous aurez réussi la tâche si vous êtes capables de remplir le tableau à l'issue de vos échanges.

Dans la seconde partie de la séance de TP/TD, après la pause, les trois groupes mettront en commun leurs échanges et devront **se mettre d'accord** sur un tableau commun. »

Tableau à remplir individuellement durant les 15 min qui suivent le temps de présentation croisée et d'échanges sur les 4 textes

	Gasparini / Sabine (2014)	Whittaker (1969)	Cavalier-Smith (1981)	Burki (2014)
Que sont les végétaux ?				
Problème(s) au(x)quel(s) la classification répond				
Justifications des choix de classification				
Questions que vous vous posez				

Les tableaux produits par chaque étudiant seront récupérés à la fin de la séance pour être analysés. Précision : si le tableau individuel est complété, modifié pendant la phase de discussion collective, le faire dans une 2e couleur (en indiquant que c'est la couleur de modification / correction).

Organisation pratique :

- le groupe de 15 étudiants est divisé en trois groupes de 5 en associant des étudiants ayant lu des articles différents et en séparant les binômes, afin que deux personnes ayant lu un même article soient issues de deux binômes différents. Ainsi les analyses peuvent être différentes et enrichir le travail de groupe.
- pour gagner du temps dans le lancement de la séance, la constitution des groupes est imposée.

2. Présentation croisée des articles en petit groupe de travail et remplissage individuel de la grille de comparaison - préparation du débat collectif (1h15)

Réalisation de l'activité correspondant à la tâche présentée.

Position de l'enseignant : il n'intervient pas mais suit l'avancement des travaux de groupes, laisse les groupes travailler de manière autonome. Il répond cependant aux éventuelles questions de compréhension des étudiants, mais sans trancher leurs désaccords.

3. **Pause (15 min)**

Durant la pause : ajustement entre le professeur et le chercheur. Rapide analyse des tableaux produits par les 15 étudiants.

4. **Débat collectif sur les quatre articles (1h15)**

Le professeur anime le débat collectif.

Le but est de se **mettre d'accord** sur un tableau bilan commun. On ne doit pas rester sur une juxtaposition de positions divergentes, mais **trancher les désaccords par un débat argumenté entre groupes.**

Le tableau vierge ci-après est vidéoprojeté. Il reprend les mêmes items que ceux de la grille d'analyse des deux articles par binôme. Le tableau est rempli au fur et à mesure par le chercheur, qui joue le rôle de secrétaire de séance, en indiquant par des couleurs les propositions des 3 groupes afin de suivre plus aisément les positions de chacun. Environ 15-20 min de discussion par article.

	Gasparini - Sabine (2014)	Whittaker (1969)	Cavalier-Smith (1981)	Burki (2014)
Objectif(s) de la classification et type de caractères utilisés				
Que sont les végétaux dans la classification?				
Euglène végétale dans la classification?				
Diatomée végétale dans la classification?				
Opposition à des classifications antérieures (Éléments de controverse scientifique)				
Justifications des choix de classification				
Usage de l'homologie dans la classification				
Méthodologie : quelle méthode est utilisée pour construire la classification?				

Pour le premier article, un groupe prend la parole et dicte à l'enseignant ses réponses pour chaque case. L'enseignant écrit sous la dictée. Puis il demande aux deux autres groupes de compléter et d'indiquer s'ils sont d'accord ou non. Un débat s'engage et le groupe se met d'accord sur une réponse finale. Les questions des étudiants et points obscures sont notés.

Le professeur anime le débat sans apporter sa position dans un premier temps. Il est important que le professeur laisse les étudiants s'exprimer et aller « au bout » de leur logique. L'idée est de voir jusqu'où le travail des étudiants en autonomie leur permet d'aller et quelle est la part du professeur.

Précision sur la gestion de la parole : être vigilant pour faire tourner la parole et éviter qu'un groupe ou quelques étudiants ne monopolisent la parole. Proposition : pour chacun des 4 articles, donner en premier la parole à un groupe différent.

Synthèse rédigée au tableau par le professeur dans les cinq dernières minutes de cette phase :

• Problème fonctionnel (nutrition par photosynthèse) associé à un problème écologique (producteurs primaires) ⇔ Végétaux (au sens fonctionnel), définis indépendamment de l'organisation cellulaire et morphologique, ainsi que de la place systématique

• Problème phylogénétique ⇔ Un groupe est monophylétique. La nature du groupe des végétaux a fortement été rectifiée avec l'évolution de la classification systématique => cf. partie suivante

6. Bilan sur l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux dans le cadre de classification phylogénétique (1h)

a. Travail par petit groupe (les mêmes groupes que lors de la 1ère phase), remplissage individuel de la seconde grille (30min)

Le professeur lance une nouvelle phase de travail par groupe en énonçant la consigne suivante.

> « Vous allez à nouveau travailler à nouveau par groupe et vous focalisez maintenant sur les trois articles portant sur la systématique des Eucaryotes. Nous laissons donc de côté le premier texte lié à la conception fonctionnelle et écologique des végétaux.
>
> 1/ Vous disposez de 30 minutes pour remplir ce nouveau tableau (distribué). L'objectif est de poursuivre le travail d'explication des changements de la classification systématique entre les 3 auteurs : Whittaker (1969), Cavalier-Smith (1981), et Burki (2014).
>
> Vous devez compléter le tableau en :
>
> - réalisant un bilan sur la méthode de classification (type de caractères utilisés et méthode de reconstruction). Nous cherchons à prendre du recul sur les 3 méthodes de classification utilisées pour indiquer **les ruptures majeures** dans l'approche de la classification.
>
> - dégageant **les conditions de possibilité techniques d'une part et théoriques d'autre part** des changements de classification systématique. Quelles sont les techniques et connaissances / théories scientifiques indispensables à la construction de chacune des 3 classifications ?

Vous pouvez vous aider du document proposé présentant une double frise chronologique.

2/ Vous dégagerez également **les modes de raisonnement relatifs à l'évolution qui ont pu faire obstacle à la construction d'une classification systématique objective détachée de tout jugement de valeur**. Pour cela, vous comparerez notamment les 3 figures représentant les arbres systématiques. Vous argumenterez votre propos en relevant les indices constituant des traces de ces modes de raisonnement. »

Précision pour le second point : il ne faut pas que le professeur indique le terme de gradisme. Nous souhaitons voir s'il émerge de la discussion entre étudiants.

b. Second débat collectif (30 min)

Le professeur anime la discussion et le chercheur remplit le tableau de comparaison (cf. ci-après) par informatique sous la dictée des étudiants, après discussion / débat. Le professeur et le chercheur ont réalisé eux-mêmes la tâche avant la séance et ont réalisé la production suivante. Elle sert d'aide au pilotage de la séance par l'enseignant, mais l'objectif est que le professeur soit au maximum dans une position d'animation du débat et de régulation des échanges. Il complète en dernier lieu.

	Whittaker (1969)	**Cavalier-Smith (1981)**	**Burki (2014)**
Bilan sur la méthodologie • Caractères utilisés • Méthode de reconstruction	• Méthode mixte utilisant des ressemblances (homologues ou non) • Caractères physiologiques et écologiques (modes de nutrition / rôles dans les communautés) Caractères cellulaires	•Utilisation d'homologies supposées mais non polarisées Principe de parcimonie • Caractères cellulaires, biochimiques	•Méthodes probabilistes Phylogénomique •Caractères moléculaires, à différentes échelles, dont les génomes
Conditions de possibilité théorique	• Théorie de l'évolution par sélection naturelle • Physiologie de la nutrition • Écologie : rôle des organismes dans les	Endosymbiose	Cladistique

	communautés		
Conditions de possibilité techniques	Microscopie optique [=> diversité de micro-organismes]	Microscopie électronique	Informatique, séquençage, PCR
Idéologie Valeurs sous-jacentes	•Niveaux d'organisation • Directions évolutives • Organismes supérieurs / inférieurs • Groupes intermédiaires • Degré de complexité	•Évolution : complexification •Filiation : groupes placés en position ancestrale (groupes intermédiaires ?) •Directions évolutives : moins clair que chez Whittaker	Pas de gradisme. [Forme de l'arbre indique la volonté de représenter tous les groupes au même degré évolutif]

Le professeur conclue de manière magistrale par une phrase du type :

> « L'analyse des articles a donc permis de dégager une pluralité de conceptions des végétaux :
>
> selon les problèmes biologiques étudiés : conception fonctionnelle / écologique vs conception phylogénétique
>
> selon l'évolution de la systématique et des classifications construites.
>
> L'évolution de la systématique dépend à la fois des méthodes de reconstruction utilisées, des techniques et connaissances / théories possiblement mobilisables, mais aussi de valeurs / d'idéologies par nature non scientifiques, introduisant une part de subjectivité. La scientificité d'une classification est donc liée à l'objectivité de sa méthode de construction, en se dégageant de toute idéologie. Nous avons pu noter un décalage entre l'ambition phylogénétique et la méthode mise en œuvre (Whittaker). »

5. Découpage du débat collectif en épisodes

Un épisode regroupe des unités sémantiques portant sur un même thème. Les thèmes principaux ont été abordés au cours du débat selon l'ordre des items des deux grilles d'analyse d'articles. Certains thèmes ont été émergents (notés *). Nous avons précisé les sous-thèmes abordés.

Numéro de l'épisode	Lignes de la transcription	Thème et sous-thème
1	1-3	Introduction par l'enseignant - consignes
Articles de Gasparini (2014) et de Sabine (2014)		
2	3-41	Objectifs fonctionnels de la classification écologique. Définir ou classer*.
3	42-56	Que sont les végétaux ? Photosynthèse comme critère. Place des cyanobactéries*
4	56-83	Euglène et diatomée : végétales. Algues et végétaux*
5	83-97	Opposition à des systèmes classificatoires antérieurs
6	97-122	Usage de l'homologie supposé. NoS : références bibliographiques importantes en science*
7	122-190	Méthode de classification. Définir, classer ou trier*
Article de Whittaker (1969)		
8	190-254	Objectifs de la classification : focalisation sur la remise en cause des classifications antérieures à 2 et 4 règnes. Caractères utilisés (nutrition et structure cellulaire). Idéologie de Whittaker (écologue et gradiste). Objectif double : phylogénie et écologie.
9	255-277	Que sont les végétaux ? (définition précise dans l'article)
10	278-313	Euglène et diatomée non végétales (protistes)
11	313-337	Opposition à des systèmes classificatoires antérieurs à 2 et 4 règnes
12	337-346	Méthode de classification (peu développée)
13	347-359	Usage de l'homologie. Principale valeur d'une classification mais non absolue. Autocritique du polyphylétisme de plusieurs règnes.
14	360-385	Méthode de classification. Parti-pris d'écologue* NoS : liens avec les techniques et théories de l'époque (frise chronologique)*
Article de Cavalier-Smith (1981)		
15	385-458	Objectif phylogénétique de la classification et caractères utilisés de nature cellulaire et moléculaire. Usage de l'homologie implicite. Recherche de groupes monophylétiques. Discussion sur la phylogénie moléculaire*
16	459-520	Que sont les végétaux ? Problème de l'absence de la photosynthèse chez certains groupes remettant en cause la monophylie des végétaux*
17	520-533	Euglène non végétale (protiste) et diatomée végétale (Chromophyte)
18	533-548	Opposition à des systèmes classificatoires antérieurs : système à 5 règnes de Whittaker et Margulis (problème du polyphylétisme) et plusieurs autres systèmes
19	549-555	Méthode : choix des critères de classification de nature cellulaire jugés plus rigoureux car plus conservés
20	555-590	Usage de l'homologie supposé car recherche de groupes monophylétiques
21	591-616	Méthode de classification. NoS : liens avec les techniques et théories de l'époque / caractère révisable de la classification au regard des nouvelles données (séquençage)*
Article de Burki (2014)		
22	616-630	Objectif phylogénétique de la classification et caractères utilisés (dont génomiques)
23	630-707	Que sont les végétaux ? Débat sur la non existence des végétaux pour Burki
24	707-712	Statut de synthèse (review) de l'article de Burki (NoS)*
25	712-778	Euglène et diatomée : végétale ou non selon la position concernant

		l'existence ou non des végétaux pour Burki (désaccord non tranché)
26	778-789	Opposition à des systèmes classificatoires antérieurs : remise en cause des protistes (Haeckel), des 5 règnes de Whittaker et Margulis. Remise en cause du gradisme. Proposition de super groupe.
27	789-795	Méthode : choix des critères de classification : données moléculaires en très grand nombre
28	795-864	Usage de l'homologie : discussion relative à l'analyse de données moléculaires et aux différentes méthodes possibles pour resituer l'approche de Burki
29	864-892	Synthèse sur les deux grands types de classification : fonctionnelle / écologique et phylogénétique
30	879-886	Discussion sur définir vs classer*
2e DEBAT DE SYNTHÈSE FOCALISÉ SUR LES 3 ARTICLES DE SYSTÉMATIQUE		
Synthèse sur l'article de Whittaker (1969)		
31	896-908	Méthodologie de classification non phylogénétique car non basée sur des homologies
32	908-958	Conditions de possibilité techniques et théoriques
33	959-1002	Idéologies mobilisée par Whittaker. Gradisme. NoS. Parti-pris d'écologue / subjectivité du chercheur
Synthèse sur l'article de Cavalier-Smith (1981)		
34	1002-1064	Méthodologie de classification : phylogénie basée sur des caractères cellulaires et biochimiques (pigments). Débat sur le fait qu'il mobilise ou non la cladistique.
35	1064-1152	Conditions de possibilité techniques (notamment microscopie électronique) et théoriques. Débat important sur la mise en œuvre de la méthode cladistique et sur l'usage de l'homologie
36	1152-1193	Idéologies mobilisée par Cavalier-Smith. Gradisme. Ambitions personnelles. NoS
Synthèse sur l'article de Burki (2014)		
37	1193-1222	Méthode phylogénomique de Burki. Discussion sur la cladistique et méthode probabiliste.
38	1222-1238	Conditions de possibilité techniques et théoriques nombreuses
39	1238-1281	Pas d'idéologie perçue. Plus de gradisme (forme sphérique de l'arbre)
Synthèse		
40	1282-1289	Conclusion sur les raisons de l'évolution du groupe des végétaux dans les trois articles systématiques

6. Transcription des deux débats collectifs

6.1. Transcription du débat collectif – partie 1

CODAGE

/ : silence court ; // : silence plus long ; (silence) : silence encore plus long . [ ] : Chevauchement. ( ) : indication non verbal ; ? : forme interrogative ; (???) mots non audibles, non transcrits .

Après le prénom :

- lettre indiquant l'article lu par l'étudiant (B : Burki ; C : Cavalier-Smith et W : Whittaker)
- numéro indiquant le groupe auquel appartient l'étudiant : 1, 2 ou 3

1	Professeur	on va démarrer / donc l'objectif maintenant c'est de mettre en commun tout que avez fait dans la salle / et de continuer le débat mais cette fois-ci inter poste / euh dans le but d'aboutir à quelque chose qui soit relativement un consensus pour la salle / alors quelques mots sur ma posture à moi / j'suis pas là pour vous donner des réponses j'suis juste là pour compiler vos données / euh / sachant que je suis là aussi éventuellement pour éclairer des points scientifiques si cela a bloqué ou quoi que ce soit mais j'suis pas là pour faire autre chose que compiler vos idées à vous / d'autre part vous avez toujours votre tableau sous le nez / rien ne vous empêche de le modifier ce tableau mais par contre merci si vous voulez apporter des modifications sur votre tableau des notes ou des compléments d'utiliser une autre couleur pour qu'on voit ce qui a été fait avant la discussion et ce qui est le fruit de la discussion maintenant / voilà / merci que les modifications soient apparentes si vous en avez / alors on va passer de
2	Chercheur	et moi je vais faire la secrétaire au fur et à mesure donc je vais essayer de mettre un code couleur alors repérez votre groupe / groupe un en bleu groupe deux en rouge groupe trois en vert et parfois les choses communes je les mettrai en noir / donc si des fois je fais des erreurs n'hésitez pas à me l'indiquer
3	Professeur	donc on va passer en revue les quatre classifications enfin les quatre articles en tout cas auxquels vous avez été soumis avec à chaque fois un certain nombre de questions qui correspondent plus ou moins à ce que vous avez rempli dans la grille / alors on va commencer par ce premier item on va commencer par Gasparini et Sabine pour ce qui est de l'article et pour ce qui est de la question on va essayer de se demander quels étaient les objectifs de la classification et le type de caractère qui ont été utilisés pour ça /alors euh / pour essayer de répartir le temps de / c'est pas tout à fait les items que vous avez dans votre tableau c'est pas grave enfin ça reviendra à peu près au même / donc pour essayer de répartir en le temps de parole c'est moi qui vais attribuer le temps de parole un premier groupe et bien sûr tout le monde pourra intervenir après l'intervention mais je vais essayer de faire tourner un peu les paroles / donc pour le premier article et ce qui est l'objectif de la classification on va peut être commencer par vous (indiquant le groupe 2) / est-ce que par rapport premier article vous pourriez nous donner votre avis par rapport aux objectifs de cette classification ? / et les autres vous pourrez rebondir après dessus
4	Evelyne C2	définir le phytoplancton
5	Pierrik W2	bah en fait il s'attarde pas sur les végétaux ce texte il s'attarde sur le phytoplancton en fait
6	Professeur	et les objectifs ?
7	Evelyne C2	définir du coup ce qu'est un phytoplancton
8	Pierrik W2	voilà
9	Professeur	oui d'accord définir phytoplancton / est-ce que vous voyez d'autres d'autres objectifs ?
10	Pierrik W2	ce qui en fait partie notamment
11	Evelyne C2	du coup le différencier du plancton animal
12	Professeur	d'accord
13	? (autre membre du Gpe 2)	il y aussi (????) mais (???) s'en fiche
14	Valérie W2	il y avait un peu d'écologie surtout (???) dans le deuxième texte
15	Professeur	alors vous aviez deux sous-articles là-dedans / est-ce que les deux obéissent aux mêmes objectifs ?

16	Pierrik W2	il parlait du rôle écologique du plancton surtout en fait
17	Professeur	d'accord // définir phytoplancton et définir zooplancton / définir le rôle écologique / est-ce que vous voyez d'autres éléments à apporter / par rapport aux objectifs de cette classif / les autres? est-ce que vous pouvez
18	Thomas B1	bah du plancton et des végétaux en général parce qu'il mentionne le cycle du carbone et le rôle des plantes dans le cycle du carbone le rôle écologique du plancton
19	Professeur	d'accord donc ça c'est surtout pour l'autre
20	Valentino W1	surtout pour le Sabine avec le cycle du carbone et la place des végétaux
21	Professeur	place des végétaux dans du carbone OK // alors quand vous dites définir phytoplancton et définir zooplancton est-ce que c'est quelque chose qui a été défini par l'article lui-même ou
22	Thomas B1	[on ne sait pas s'il se base sur des
23	Valentino W1	enfin il précise phytoplancton il dit capable de photosynthèse] zooplancton du coup par l'inverse c'est tous ceux qui font [pas
24	Aude C1	il y a] la taille aussi qui entre en compte
25	Professeur	d'accord /et alors globalement à l'échelle des deux articles que vous avez est-ce que vous pourriez prendre un peu de recul et est-ce que vous pourriez dégager un objectif commun dans les classifications qui sont évoquées dans ces deux articles est-ce qui a des dénominateurs communs entre les deux est-ce que
26	Thomas B1	la photosynthèse le dénominateur commun c'est la photosynthèse
27	Professeur	d'accord photosynthèse comme dénominateur commun
28	Benoît W3	c'est physiologique en fait / sur le mode
29	Valentino W1	caractère physiologique
30	Professeur	d'accord // oui alors dans quel dans quel but ces éléments-là phytoplancton zooplancton végétaux sont mobilisés est-ce qui a est-ce que ça répond à des questions particulières que les auteurs se posent ?
31	Benoît W3 (?)	qu'est-ce que le plancton
32	Professeur	qu'est-ce que le plancton c'est un objectif en soi de l'article ou?
33	Manuella B3	quel est le rôle [des végétaux
34	Thomas B1	quelle est la place]
35	Manuella B3	dans le cycle du carbone quel est leur rôle
36	Professeur	d'accord donc c'est quel grand type de question ça auquel répondrait la classification
37	Thomas B1	écologique
38	Professeur	pourquoi est-ce qu'ils ont utilisé les végétaux
39	Manuella B3	écologique
40	Professeur	d'accord donc plutôt dans une optique écologique / OK
41	Pierrik W2	c'est juste une définition que donne une encyclopédie un cours approfondi
42	Professeur	d'accord donc en termes d'objectifs que les auteurs se sont fixés en mobilisant zooplancton phytoplancton végétaux voyez d'autres choses à ajouter / non / OK / alors par rapport à ces deux systèmes de classification est-ce que vous pourriez dire ce que sont les végétaux ? / alors on tourne peut-être vous (groupe 3)
43	Manuella B3	bah pour Gasparini on parle des phytoplanctons [du coup
44	Professeur	ouais
45	Manuella B3	qui sont] des organismes unicellulaires photosynthétiques
46	Professeur	d'accord
47	Benoît W3	pas des végétaux en tant que tel en fin de compte / on pense que lui il ne limite pas les végétaux à unicellulaires et seulement unicellulaires quoi
48	Manuella B3	il parle que du phytoplancton quoi
49	Benoît W3	en fait est-ce qu'on parle des végétaux on parle de certains organismes parmi ces végétaux qui seraient unicellulaires
50	Professeur	d'accord OK
51	Benoît W3	et par contre on s'est posé la question de savoir si lui il définissait les cyanobactéries comme des phytoplanctons végétal ou pas parce finalement un coup dit qu'ils en font parti / euh qu'ils en font partie et puis ensuite il dit qu'ils sont des bactéries particulières est-ce que pour lui des bactéries particulières peuvent être des végétaux on sait pas trop
52	Professeur	d'accord alors les autres par rapport à cette question-là est-ce que vous avez / vous avez trancher? / qu'est-ce que ça recouvre en fait / la catégorie végétal au travers des différents articles est-ce

53	Thomas B1	bah les deux articles pour moi / si enfin comme je suis assez d'accord avec leur définition enfin surtout vis à vis de Gasparini il parle que du phytoplancton de ce que j'ai compris il limite pas les végétaux au phytoplancton mais du coup si on compile les deux articles le point commun qui me vient c'est la photosynthèse du coup à part dire que les végétaux ont une capacité photosynthétique et donc que ça induit un rôle dans le cycle du carbone qui permet de décliner les végétaux en phytoplancton et autre [chose
54	Professeur	d'accord] OK / et par rapport à la question cyanobactérie est-ce que tout le monde a le même positionnement est-ce que ils sont / les cyanobactéries sont incluses ou non dans les végétaux ?
55	Laurène B2	moi quand je lis la phrase là / parmi ces catégories le phytoplancton désigne le plancton végétal / capable de photosynthèse il est principalement composé d'algues unicellulaires et de cyanobactéries pour moi le il et constamment le il désigne le phytoplancton donc cyanobactéries fait partie du phytoplancton
56	Professeur	d'accord / donc j'inclue les cyanobactéries dedans / d'accord / donc comme critère essentiel / d'accord /a priori photosynthèse / alors ensuite par rapport à ces questions là il y a deux groupes qui serviront de fil rouge enfin pour lesquels on va se poser la question à chaque fois dans les différents systèmes de classification est-ce que dans cette classification ce sont des végétaux ou pas / donc les euglènes d'une part / et les diatomées d'autre part / alors par rapport aux euglènes qu'est-ce que vous en pensez ? //
57	Plusieurs étudiants	ils font partie des végétaux ils font partie du phytoplancton
58	Professeur	ils en font partie / donc sur quelle base ?
59	Plusieurs étudiants	photosynthèse
60	Professeur	photosynthèse d'accord / donc oui car photosynthétique
61	Aude C1	aquatiques
62	Laurène B2	algues unicellulaires
63	Thomas B1	oui algues unicellulaires
64	Professeur	OK / et par rapport à algues qu'est-ce que c'est algues dans ces articles ça correspond à quoi parce que vous citez le terme et vous semblez y mettre un poids
65	Valentino W1	un végétal c'est considéré comme un végétal
66	Professeur	c'est considéré comme un végétal / [tous les végétaux sont des algues?
67	Thomas B1	c'est pas dit/ c'est sous-entendu / mais oui c'est sûr]
68	Valentino W1	pardon c'est quoi la deuxième question ?
69	Professeur	est-ce que tous les végétaux sont des algues ?
70	Valentino W1	ah non / tous les végétaux ne sont pas des algues / [les algues sont des végétaux mais les végétaux ne sont pas que des algues
71	Héloïse C3	les algues sont des végétaux]
72	Professeur	d'accord les algues sont des végétaux dans la mesure où ce sont des algues ce sont des végétaux
73	Laurène B2	ils disent aussi flagellés chlorophylliens
74	Professeur	OK
75	Laurène B2	(propos pas audible) flagellés chlorophylliens ça répond à un problème
76	Professeur	OK // OK et même question donc pour les diatomées est-ce que
77	Thomas B1 et Valentino W1	ouais pareil
78	Manuella B3	pareil (confirmation par plusieurs étudiants)
79	Professeur	du fait que ce soit une unicellulaire c'est le critère qui voulait faire entrer dans les végétaux selon cette définition le fait que ce soit une algue unicellulaire
80	Thomas B1	non c'est la photosynthèse aussi / capacité photosynthétique avant tout
81	Professeur	capacité photosynthétique d'accord
82	Thomas B1	parce que c'est la seule chose vraiment définie / enfin pour moi / dans les différents articles
83	Professeur	tout le monde est d'accord sur ces points là ? sur la délimitation qu'on en fait alors est-ce que cette classification / donc des végétaux s'oppose à d'autres systèmes de classification antérieurs est-ce que vous avez repéré des / des oppositions avec d'autres choses qui avaient été faites ou pas

84	Héloïse C3	pas clairement mais enfin / nous dans notre binôme on a fait / enfin quand au tout début il dit habituellement considéré comme nourriture de baleine donc ça sous-entend que c'était une manière de définir le plancton et que lui il veut donner une autre définition en se basant sur d'autres critères
85	Professeur	d'accord / donc affiner des choses qui auraient été vues auparavant peut-être
86	Héloïse C3	oui avec un autre critère
87	Benoît W3	c'est le mot habituellement on ne sait pas trop si en français c'est / parce que des fois on dit habituellement on peut penser ça par habitude les gens peuvent penser ça dans la conception générale / du coup on se demande si c'est quelque chose qu' il considère comme vrai ou que justement / d'un peu trop simpliste justement
88	Professeur	en tout cas une volonté de clarifier ce qu'est / ce qu'est plancton / d'accord / alors est-ce que vous avez vu dans ces articles une justification des choix qui avaient été utilisés pour faire pour mobiliser cette classification est-ce que vous avez repéré quelque chose de particulier
89	Valentino W1 et Thomas B1	non pas vraiment / pas vraiment justifié
90	Professeur	d'accord pas de justification particulière
91	Thomas B1	enfin je sais pas j'ai pris la parole pour mon groupe mais
92	Aude C1	c'est plus d'un point de vue anatomique / parce que c'est la taille qui rentre en compte pour le phytoplancton
93	Professeur	d'accord c'est plus les caractères [de classification
94	Aude C1	physiologique]
95	Professeur	mais ça s'oppose à / enfin c'est pas une classification qui est construite sur la base d'une opposition avec quelque chose [
96	Plusieurs étudiants	non]
c	Professeur	avec de nouveaux arguments qui / OK // alors est-ce que l'homologie est utilisée dans cette classification ?
98	Thomas B1	on sait pas
99	Valentino W1	oh non c'est pas explicite
100	Florent W1	c'est pas mentionné
101	Thomas B1	c'est pas mentionné / après peut-être mais
102	Professeur	peut-être peut-être pas qu'est-ce que vous en pensez ? est-ce que vous pourriez détailler un petit peu pourquoi est-ce que l'homologie aurait été oui ou non mobilisée dans cette classification ?
103	Valentino W1	il regroupe le phytoplancton sous la / photosynthétique donc sous-entendu peut être un organisme ancestral photosynthétique du coup qui est à l'origine / mais c'est vraiment
104	Thomas B1	c'est nous qui en tirons c'est
105	Professeur	est-ce que ça c'est sous-entendu est-ce que explicitement ou pas / ce serait bien que les autres groupes se prononcent par rapport à ça qu'on puisse / qu'on puisse trancher de manière
106	Benoît W3	c'est pas explicite je pense que le texte n'est pas assez long pour le coup on ne sait pas s'il a voulu expliquer cette dimension-là on pense que oui [puisque
107	? (étudiant non identifié)	oui] (confirmation du propos)
108	Benoît W3	on ne sait pas vraiment s'il se repose là-dessus on pense que oui parce qu'il regroupe tous ces organismes dans la photosynthèse et après c'est / on ne sait pas vraiment s'il se repose là-dessus / c'est pas assez long c'est pas assez explicite pour
109	Thomas B1	soit il est pas assez long soit on n'a pas les références sur lesquelles il s'est appuyé pour [dire ça
110	Valentino W1	ouais il ne s'attarde pas dessus en fait]
111	Thomas B1	si on avait les références bibliographiques si enfin s'il s'était basé je sais pas sur Whittaker sur Y sur X enfin
112	Professeur	alors pour discuter de l'usage de l'homologie ou pas d'ailleurs / il faudrait peut être s'entendre sur ce mot là puisque / dans quel sens vous l'entendez ce mot homologie ?
113	(silence 7 secondes)	
114	Benoît W3	j'ai mis des caractères dérivés d'ancêtre commun

115	Professeur	alors des caractères dérivés d'ancêtre commun
116	Valentino W1	transmis par un ancêtre enfin caractère de la descendance transmis par un ancêtre
117	Professeur	d'accord transmis hérité d'un ancêtre commun / OK / et est-ce que je reviens à la question de départ est-ce que ça c'est évoqué quelque part ?
118	Laurène B2et Héloïse C3	non
119	Benoît W3	non pas explicitement
120	Professeur	d'accord donc / à la question usage de l'homologie dans la classif est-ce que c'est explicitement utilisé ?
121	Benoît W3 (et d'autres)	non
122	Professeur	d'accord / alors est-ce que vous avez vu aussi une méthodologie donc particulière pour classer les organismes
123	Manuella B3	non
124	Valentino W1	c'est pas construit c'est pas euh
125	Professeur	tu dis c'est pas construit est-ce que / ça veut dire / qu'est-ce que t'entends par là ?
126	Thomas B1	il ne fait pas de classification en tant que tel enfin / quand on compare puisqu'on a trois autres articles où la vraiment il y a des classifications là on peut pas dire vraiment qu'il y a une classification il y a une définition du phytoplancton / il y a la mention du caractère photosynthétique dans le cycle du carbone qui est important et qui serait effectué par les végétaux mais est-ce qu'on peut parler de classification ?
127	Professeur	alors pour qu'on soit parfaitement clair est il y a une classification ou pas dans cette ces articles ?
128	Valentino W1	il y en a une pour le phytoplancton animal et végétal
129	Manuella B3	et végétal ouais
130	Thomas B1	ouais c'est ça
131	Laurène B2	on distingue quand même animal de végétal
132	Professeur	d'accord
133	Benoît W3	il y a une envie de classer ça c'est sûr de regrouper des organismes mais mais est-ce qu'on peut parler d'une classification là je je sais pas
134	Professeur	alors c'est quoi une classification ?
135	Valentino W1	c'est classer
136	Manuella B3	c'est regrouper les organismes en fonction de certains [caractères
137	Valentino W1	c'est agglomérer]
138	Manuella B3	donc là effectivement oui
139	Professeur	oui donc va regrouper oui / est-ce qu'il y a quelque part là dedans
140	Valentino W1	c'est plus trier en fait
141	Professeur	est-ce que c'est trier ? est-ce qu'il y a un regroupement ou pas ?
142	Manuella B3	un peu oui / pour les phytoplanctons oui
143	Evelyne C2	bah oui [il y a séparation
144	Benoît W3	bah c'est regrouper quand même] / pour cette table on s'accorde à dire qu'il y a quand même qu'il y a un regroupement quand même [des phytoplanctons des zooplanctons
145	Manuella B3	plancton photosynthétique phytoplancton] et non photosynthétique [zooplancton
146	Professeur	donc il y a] des regroupements / qui [sont faits
147	Manuella B3	pour moi oui]
148	Professeur	qui sont faits qui sont construits par l'auteur / est-ce qu'ils sont est-ce que ces regroupements sont construits par l'auteur ?
149	(petite discussion du groupe 3 en parallèle)	
150	Benoît W3	est-ce que c'est pas ranger ? c'est pas trier ?
151	Professeur	est-ce qu'ils sont cités par l'auteur / construits par l'auteur ?
152	Benoît W3et Florent W1	ils sont cités / ils sont cités plus que construits par l'auteur
153	Manuella B3	cités
154	Héloïse C3	oui c'est classer mais est-ce que c'est classifier ?
155	Professeur	est-ce que tout le monde est d'accord ? peut être par rapport à vous (en s'adressant au groupe 2) est-ce qu'il y a une classification qui est mobilisée ou pas / enfin évoquée mobilisée juste pour qu'on s'entende là-dessus puisque tu as dit que peut être il n'y avait pas de classification pour qu'on soit d'accord
156	Thomas B1	par rapport aux végétaux moi je disais cela par rapport aux végétaux

157	Héloïse C3	(en réponse à Benoît W3 dans le cadre d'une petite discussion au sein du groupe 3 peu audible sur ce qu'est classer)
158	Professeur	qu'est-ce que je fais ? est-ce que je mets qu'il n'y a pas classification ou est-ce que je mets qu'il y en a une?
159	Laurène B2	pas interne aux végétaux
160	Thomas B1	pas inhérente aux végétaux
161	Professeur	alors quels seraient les éléments de classification qui seraient ?
162	Manuella B3	photosynthèse // la photosynthèse
163	Professeur	et dans l'autre article est-ce que c'était la même chose aussi ou pas ?
164	Héloïse C3	sur une fonction on s'appuie sur une fonction / dans l'autre article
165	Manuella B3	dans l'autre article [ouais c'est
166	Professeur	mais est-ce que] c'est une classification ou pas / s'appuyer sur une fonction
167	(silence 3 secondes)	
168	Thomas B1	quelle est la question ?
169	Professeur	par rapport à l'autre article au deuxième / je sais plus qui si c'est Héloïse C3 ou Manuella B3 qui dit que ça s'appuyait sur une fonction pour regrouper [
170	Héloïse C3	consommation de CO2]
171	Professeur	est-ce que c'est une classification ou pas ?
172	Evelyne C2	si on utilise le critère / enfin la fonction comme un critère de regroupement oui
173	Professeur	partant du principe qu'il y a un critère pour regrouper
174	Evelyne C2	ou différencier enfin je veux dire c'est pas forcément / on peut diviser aussi
175	Professeur	est-ce que diviser c'est la même logique ? est-ce que c'est pareil diviser / est-ce qu'on peut classer en divisant
176	Benoît W3	pas pour moi (en chuchotant)
177	Valentino W1	non / classer c'est l'agglomération plutôt
178	Marina W3	non parce que classer c'est regrouper donc
179	Professeur	donc je repose ma question désolé mais c'est pour que ce soit bien clair est-ce qu'il y a du regroupement quel qu'il soit dans ces deux articles ?
180	Thomas B1	au sein du phytoplancton oui puisqu'il dit qu'il y a les diatomées il dit que c'est des algues unicellulaires il dit qu'il y a des bactéries et cyanobactéries mais c'est vraiment au sein du phytoplancton
181	Professeur	au sein du phytoplancton / et pour l'autre article c'est pareil ?
182	Thomas B1	non
183	Valentino W1	l'autre article [c'est tout photosynthétique
184	Thomas B1	les organismes photosynthétiques
185	Manuella B3	les organismes qui consomment le CO2 c'est les végétaux les autres qui jouent dans le cycle du carbone c'est /
186	Héloïse C3	les autres
187	Manuella B3	c'est les autres]
188	Professeur	donc il y a une agglomération aussi ou ? / c'est juste une question parce que est il y a des organismes qui sous-tendu sont groupés ensemble ou pas ?
189	Aude C1	bah oui ceux qui font la photosynthèse
190	Professeur	d'accord / OK / bon on va passer à l'autre / aux autres articles on va commencer par l'article de Whittaker / on va commencer par vous (en s'adressant au groupe 1) bon (propos pas clair) est-ce que pareil si on reprend les items est-ce que vous pourriez m'expliciter un peu les objectifs de cette classification ?
191	Valentino W1	alors c'est de rediscuter des différentes classifications des organismes donc du modèle à deux règnes puis du modèle à quatre règnes
192	Professeur	ouais
193	Valentino W1	donc il les présente puis après il les rediscute il présente les points positifs les points négatifs et notamment sur la place des organismes unicellulaires
194	Professeur	d'accord / alors est-ce qu'il y a / les autres vous pouvez rajouter quelque chose aussi
195	Florent W1	il définit aussi ses groupes enfin pour lui il y a l'importance du mode de nutrition dans sa classification
196	Professeur	d'accord alors dans les caractères utilisés on mettrait les modes de nutrition
197	Valentino W1	et la structure cellulaire
198	Professeur	structure cellulaire
199	Valentino W1	qui sont deux critères

200	Florent W1	unicellulaires ou pluricellulaires
201	Professeur	unicellulaires ou pluricellulaires donc
202	Valentino W1	procaryotes unicellulaires
203	Professeur	d'accord organisation juste par rapport à ça est-ce que les autres veulent ajouter quelque chose ?
204	Manuella B3 et Héloïse C3(?)	non
205	Professeur	les différentes classifications les modèles à 2 et 4 règnes est-ce qu'il a un but qui est au dessus de ça ? / dans quel but finalement il discute les modèles à deux ou quatre règnes ?
206	Marina W3	parce que pour lui les autres / elles sont pas valides elles fonctionnent pas / enfin
207	Professeur	ouais et qu'elles étaient les prétentions de ces modèles à deux et quatre règnes quels étaient leurs buts ?
208	Thomas B1	distinguer animaux et végétaux
209	Valentino W1	oui surtout le modèle à deux règnes c'était animal ou végétal en fait / pour montrer que c'est moins catégorique en fait / que c'est
210	Thomas B1	on pourrait même dire que c'était animal ou pas animal et donc végétal
211	Professeur	d'accord et quatre règnes c'était pareil aussi ?
212	Thomas B1	c'était Copeland c'est ça
213	Florent W1 et Valentino W1	ouais
214	Florent W1	et par rapport à Copeland il voulait aussi redéfinir tout ce qui était unicellulaire parce qu'il y avait un problème avec les animaux unicellulaires ou les végétaux unicellulaires
215	Professeur	d'accord et tout à l'heure pour Gasparini vous aviez parlé de classification qui était basée sur des niveaux écologiques et tout ça est-ce que les classif à deux et quatre règnes et celle de Whittaker est-ce qu'on était dans même registre ?
216	Valentino W1	Whittaker on a vu qu'il était écologue donc là aussi il y a un peu une part pareil d'écologie
217	Professeur	oui est-ce que c'est la seule part que vous voyez
218	Valentino W1	bah sur le mode de nutrition il se base dessus
219	Professeur	est-ce que c'était son but en soi est-ce que sa classification avait des prétentions particulières ou est-ce que ça cherchait juste à faire des paquets écologiques comme ça / procaryote eucaryote
220	Thomas B1	on sait pas / enfin personnellement je sais pas s'il avait des prétentions / s'il avait un but comme là on en est / enfin c'est ce qu'on disait en cours il a choisi les caractères qu'il étudiait et il s'est basé sur ceux qu'il connaissait le mieux ou ceux qui pour lui enfin il y a quand même un jugement de valeur entre guillemets parce qu'il a choisi les critères de modes de nutrition donc plutôt écolocentré on va dire et du coup elle est quand même orientée et même dans sa représentation il y a il reste une part de gradisme aussi
221	Professeur	[alors est-ce qu'il y a que] de l'écologie dans son dans son système de classification
222	Valentino W1	[il y a la part de gradisme]
223	Thomas B1	non parce qu'il s'il se base aussi sur les différents niveaux d'organisation
224	Valentino W1	voilà c'est ça il n'y a pas que l'écologie mais ça a orienté son
225	Thomas B1	il n'y a pas que ça mais
226	Professeur	mais derrière les écologie derrière les niveaux d'organisations est-ce qu'il n'y a pas d'autres idées qu'il essaie de faire ressortir
227	Thomas B1	bah il / vas y Laulau (en s'adressant à Laurène)
228	Professeur	excuse moi je t'ai
229	Laurène B2	il me semble que par rapport à l'article précédent il essaie de faire des liens de parenté enfin un peu entre les espèces par rapport à celui d'avant
230	Thomas B1	ouais c'est vrai
231	Professeur	alors est-ce que c'est un de ces objectifs ou pas
232	Valentino W1	oui quand même parce qu'il parle un peu de monophyl de groupe monophylétique et polyphylétique
233	Professeur	ouais
234	Valentino W1	il cherche à faire des liens de parenté faite avec les moyens [de
235	Pierrik W2	du bord]

236	Valentino W1	du bord oui voilà
237	Professeur	d'accord
238	Thomas B1	après tant qu'on était dans le gradisme / il parle quand même de / enfin il mentionne three highers kingdoms donc il y aurait trois règnes supérieurs aux autres qui sont les fungi les animaux et les plantae
239	Professeur	d'accord mais est-ce que ça c'est un objectif ou est-ce que c'est finalement quelque chose que vous voyez au travers de
240	Valentino W1	[non c'est involontaire
241	Thomas B1	c'est implicite] enfin involontaire plus ou moins
242	Pierrik W2	quand on regarde son schéma de représentation il y a un point de départ en fait pour lui
243	Valentino W1	oui le point de départ il est chez les procaryotes
244	Pierrik W2	et enraciner tout ça peut être aussi
245	Professeur	d'accord donc pour finir sur les objectifs de cette classification si / si je devais compiler tout ce que vous avez dit donc est-ce que l'idée d'évolution y ait ou pas ou
246	Plusieurs étudiants	oui quand même / oui
247	Valentino W1	oui parce que c'est représenté par des flèches sur sa
248	Professeur	enfin la prétention en tout cas pas forcément que ce soit conforme à ce que
249	Valentino W1	c'est un de ses objectifs parce qu'il représente avec des flèches un point de départ une évolution
250	Professeur	et écologie je garde aussi ou pas / c'est ouvert mes questions je ne cherche pas du tout à vous orienter
251	Thomas B1	bah pour nous oui mais après je sais pas si pour les autres
252	Héloïse C3	par rapport au mode de nutrition oui
253	Valentino W1	oui par rapport au mode de nutrition
254	Professeur	d'accord
255	Professeur	alors dans cette classif du coup est-ce qu'on peut essayer de définir les végétaux c'est quoi pour lui les végétaux dans cette classif ?
256	Thomas B1 (et autres du groupe 1)	il a une [définition bien précise
257	Pierrik W2	organismes eucaryotes[[pluricellulaire
258	Professeur	ouais alors] c'est quoi ?
259	Thomas B1	(chuchotant s'adressant à Valentino) vas y mets tout ce que t'as c'est le moment là c'est ton moment
260	Valentino W1	alors organismes pluricellulaires avec une paroi possédant généralement une vacuole et des pigments photosynthétiques / un mode de vie qui va être fixé
261	Autres membres du groupe 1	(propos pas audible) c'est pas grave l'important c'est qu'on voit ce que c'est
262	Valentino W1	pardon / photosynthétiques
263	Florent W1	généralement fixés
264	Valentino W1	généralement fixés / euh un mode de nutrition photosynthétique et une reproduction de type sexué ou asexué
265	Professeur	OK
266	Thomas B1	(chuchotant à Valentino) il n'y a pas un peu d'absorbotrophie tu m'avais dit
267	Valentino W1	et un peu d'absorbotrophie
268	Professeur	quand tu dis un peu d'absorbotrophie
269	Benoît W3	en fait ils sont majoritairement photosynthétiques et il y en a quelques-uns qui ont adopté le mode de nutrition absorbo/ euh
270	Valentino W1	absorbotrophe
271	Benoît W3	absorbotrophe
272	Professeur	absorbotrophe d'accord / OK / est-ce que les autres ont quelque chose à rajouter par rapport à cette définition
273	Valérie W2	on avait la même définition
274	Professeur	d'accord
275	Florent W1	en même temps il l'a écrit clairement dans
276	Thomas B1	il l'a écrite il l'avait défini dans son article en plus / c'est logique

277	Valentino W1	y' en a c'est moins clair
278	Professeur	alors par rapport au groupe un peu repère euglènes et diatomées qu'est-ce que vous en pensez ? tout d'abord pour euglènes [est-ce qu'elles en font partie ?
279	Valérie W2	protistes]
280	Benoît W3 (en même temps)	protistes]
281	Florent W1	[non c'est dans les protistes
282	Marina W3	ils sont dans les protistes]
283	Pierrik W2	il les mets pas dans les végétaux
284	Valentino W1	donc c'est pas un végétal pour lui c'est protistes
285	Valentino W1	donc c'est pas des plantae
286	Professeur	oui ou non ? C'est dedans c'est pas dedans ?
287	Plusieurs étudiants de différents groupes	non
288	Professeur	non / et sur quelle base c'est pas dedans?
289	Valentino W1	parce que c'est [unicelullaire
290	Florent W1	c'est unicellulaire] en fait il définit les végétaux comme pluricellulaires
291	Professeur	donc c'est dans un groupe à part / parce qu'unicellulaires d'accord / même question pour les diatomées
292	Pierrik W2	même réponse
293	Benoîte	[pareil
294	Florent W1	c'est la même chose]
295	Valentino W1	exactement
296	Professeur	pareil
297	Valentino W1	même que l'autre / diatomées n'est pas
298	Professeur	selon le même critère aussi
299	Valentino W1	voilà / ça s'appelle les Chrysophyta
300	Thomas B1	ah ouais les Chrysophyta
301	Valentino W1	Chrysophyla pardon
302	Chercheur	phyla ?
303	Pierrik W2	[non phyta / dans l'arbre c'est Chrysophytes
304	Valentino W1	je crois que c'est Chrysophyla vous nous avez dit]
305	Pierrik W2	Chrysophyta
306	(discussion au sein du groupe 1 / la réponse de Pierrik W2 ne suffit pas au groupe 1 ou bien pas entendue ?)	
307	Florent W1	c'est Chrysophyla je crois
308	Fille du gpe 1 (Helena B1 ou Aude C1 ?)	bah
309	Valentino W1	attends / c'est écrit dans la définition
310	Thomas B1	texte / texte de ...
311	Valentino W1	phyta pardon
312	Thomas B1	phyta phyta
313	Professeur (une fois la petite discussion de groupe finie)	Chrysophyta d'accord / alors on en a un petit peu parlé déjà mais on va approfondir par rapport à son opposition par rapport à des classif antérieures donc il s'opposait à quoi ?
314	Pierrik W2	aux deux règnes et aux quatre règnes
315	Professeur	il s'opposait aux classif à deux règnes est-ce que vous pouvez me rappeler sur quelles bases il s'oppose à cette classif
316	Valérie W2	avec les unicellulaires
317	Pierrik W2	parce qu'il n'est pas d'accord / plein de choses
318	Professeur	ouais / par rapport aux unicellulaires quoi ?
319	Valérie W2	non parce que / aux deux règnes c'était végétal c'était quelque chose qui était photosynthétique et fixé / et animal c'était mobile et qui ingérait de la nourriture du coup les unicellulaires il y en a qui ont des flagelles et qui sont photosynthétiques

		donc ça rentrait ni dans l'un ni dans l'autre enfin c'était un peu des deux du coup il disait on ne pouvait pas intégrer les unicellulaires dans cette classification
320	Professeur	d'accord
321	Professeur	donc problème des unicellulaires c'est le seul problème qui se dégage par rapport à sa classification à deux règnes
322	Pierrik W2	et la distribution des modes de nutrition
323	Professeur	et ?
324	Pierrik W2	et la distribution des modes de nutrition qui n'était pas bien claire dans le mode à deux règnes
325	Professeur	d'accord / et par rapport aux classif à quatre règnes ? qu'est-ce que vous voyez de / pour ceux qui ont lu l'article est-ce qu'il y avait une opposition particulière à ce système et qui était basée sur quoi ?
326	Pierrik W2	alors encore le problème des unicellulaires
327	Professeur	problème des unicellulaires
328	Valentino W1	les algues vertes / les chlorophytes et les charophytes dans la classif à quatre règnes ça lui posait un problème aussi
329	Professeur	alors quel problème est-ce que
330	Valentino W1	je ne sais plus j'ai plus le texte j'ai juste la
331	Professeur	ceux qui l'ont lu cet article là est-ce que vous avez vu le problème par rapport à la classif à quatre règnes ?
332	Valentino W1	il y avait écrit la disposition des / ouais / ah j'ai pas le texte
333	Thomas B1	l'image n'est pas belle [chuchotant dans son groupe]
334	Manuella B3	vous n'aviez pas dit qu'ils n'avaient pas pris en compte l'aspect nutritif
335	Benoît W3	il n'y a pas l'aspect nutritif qui a été pris en compte
336	Marina W3	et il y a une histoire d'organisation cellulaire aussi
337	Professeur	c'est tout ce que vous voyez ? / oui alors comment est-ce que maintenant / d'accord il s'est opposé à d'autres systèmes comment il justifie ses propres choix à lui / est-ce qu'il y a une justification particulière d'utiliser de nouveaux critères / d'utiliser des // on a dit qu'il regardait lui les / si c'était des niveaux d'organisation cellulaire et des types de nutrition
338	Pierrik W2	c'est ça de trier par ces caractères là
339	Professeur	est-ce qu'il justifie ce choix là particulier d'utiliser ces critères là / est-ce que vous avez vu des éléments qui dans le texte justifiaient que ces critères soient meilleurs que d'autres ou des bons critères
340	Florent W1	bah déjà il a défini par rapport à tout ce qui était unicellulaires pluricellulaires et après il a justifié après tout ce qui est mode de nutrition du fait que ce soit plus facile à classer que les anciennes classifications / les anciennes classifications elles avaient des problèmes sur plusieurs espèces et avec le mode de nutrition il est sûr de pouvoir classer ces espèces
341	Professeur	d'accord il résout des problèmes des autres classifs par ce biais donc c'est une question de facilité c'est une question pratique / est-ce qu'il y a une autre motivation que ça ou des buts pratiques / est-ce que vous avez vu des choses
342	Valentino W1	dans une de ses phrases il dit que la transition entre l'unicellulaire et le pluricellulaire c'est quelque chose qui va être plus logique en fait dans le sens où il y a encore une part de gradisme donc on est parti des unicellulaires aux pluricellulaires donc dans sa logique c'est comme ça en fait / il pense que c'est un meilleur concept en fait / enfin pour comprendre l'évolution il pense que c'est un meilleur
343	Professeur	il le justifie où il ne le justifie pas ?
344	Valentino W1	il ne le justifie pas spécialement
345	Professeur	d'accord / OK
346	Florent W1	oui c'est trop logique
347	Professeur	alors est-ce que du coup l'homologie c'est un critère qui est mobilisé ou pas ? est-ce que c'est cité est-ce que c'est évoqué est-ce que c'est utilisé ?
348	Marina W3	il l'évoque et il parle beaucoup d'homoplasie aussi et il dit que pour lui l'homologie c'est très important pour faire une classification et un groupe monophylétique / mais il dit que lui il n'a pas réussi à l'utiliser donc il est favorable à l'idée et c'est important mais il n'a pas réussi à l'intégrer dans sa classification à lui
349	Professeur	d'accord donc c'est évoqué il a conscience de la chose mais [c'est pas utilisé concrètement

350	Thomas B1	(chuchotant à son groupe) c'est lui aussi Whittaker qui dit que c'est plus cohérent ?
351	Valentino W1	que c'est plus logique pour que ça soit viable]
352	Professeur	dans sa façon de catégoriser
353	Valentino W1	pour faire quelque chose de vraisemblable il faut l'utiliser
354	Thomas B1	il est mieux d'avoir un groupe monophylétique pardon je t'ai coupé (en s'adressant à Valentino W1)
355	Professeur	mais il ne le fait pas / est-ce qu'il le fait ou est-ce qu'il ne le fait pas ? est-ce que
356	Valentino W1	il ne fait pas puisqu'il s'autocritique en disant qu'il obtient des groupes polyphylétiques
357	Florent W1	en fait il tend à le faire mais il a quand même quelques groupes poly
358	Professeur	d'accord OK / donc c'est quand même évoqué
359	Valentino W1	il dit que c'est la principale valeur d'une classification d'obtenir les groupes monophylétiques mais que par exemple / ses trois / ce qu'il appelle ses trois règnes supérieurs sont polyphylétiques
360	Professeur	d'accord / vous voyez des choses à rajouter par rapport à ça / non ? ça vous semble / il y a d'autres / et alors par rapport à la méthodologie ? est-ce que est-ce qu'il y a une méthode que vous pourriez dégager qui lui a permis de construire ses catégories ou pas ?
361	Valérie W2	il compare le mode de nutrition
362	Pierrik W2	homoplasie
363	Valérie W2	et sur la structure cellulaire surtout
364	Professeur	d'accord et comment est-ce qu'il va les mobiliser est-ce qu'il y a une méthode particulière pour utiliser ces ressemblances là
365	Pierrik W2	observations
366	Professeur	donc observations
367	Pierrik W2	il recense les caractères et puis voilà
368	Professeur	recensement des caractères
369	Valérie W2	puis il rassemble quand ils ont les mêmes
370	Pierrik W2	il fait des boîtes
371	Professeur	il rassemble sur la base de caractères / sur la base d'observations est-ce qu'il y a d'autres précisions par rapport à la manière dont il procède / non / OK / est-ce que vous voyez autre chose à ajouter par rapport à ce système-là ? par rapport à la méthode qui utiliserait ou pas ou / non / c'est juste de l'observation on recense les caractères et on groupe / d'accord / OK
372	Thomas B1	oui les progrès / ouais les progrès technologiques ne faisaient pas qu'il avait encore accès à tout ce qui était moléculaire tout ça quand on regarde la frise qu'on nous a donné il est avant / enfin au niveau des théories qui sont en cours / Margulis a parlé de l'endosymbiose l'année avant / la cladistique ça fait quatre ans qu'elle est arrivée / avec Hennig / du coup il a fait ce qu'il pouvait avec les moyens / les moyens qu'il avait
373	Aude C1	(chuchotant dans son groupe) en tant qu'écologiste est-ce qui se serait vraiment servi de ça
374	Professeur	d'accord
375	Thomas B1	mais après oui la question elle est pas bête en tant qu'écologiste est-ce qui se serait vraiment servi de ça / on ne sait pas
376	Professeur	d'accord OK / écologiste (en s'adressant au chercheur)
377	Chercheur	en tant qu'écologiste il y a un parti-pris c'est ça ?
378	Aude C1	en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait vraiment servi de ces données là
379	Florent W1	après on n'est pas sûr
380	Aude C1	lui il est plus sur un autre / plus physiologiste / plus sur comment fonctionne de
381	Professeur	alors quelle question vous vous posez par ça ? par le fait qu'en tant qu'écologiste est-ce qu'il se serait posé la question
382	Aude C1	est-ce que c'est vraiment ce qui l'intéresse en fait / (quelques mots non audibles) le fonctionnement des organismes
383	Professeur	d'accord vous voulez dire qu'il se serait centré sur ses propres préoccupations
384	Aude C1	ouais / enfin après j'ai pas lu l'article mais c'est comme ça que je l'ai compris
385	Professeur	très bien alors on passe à / c'est bon pour ça on a rempli toutes les catégories / alors on passe à l'article de Cavalier-Smith /[
386	Héloïse C3	alors lui il dit]

387	Professeur	alors pareil / même question par rapport à ses objectifs / à quels objectifs il cherche à répondre finalement à travers sa classification et quels caractères il a utilisé / je reviens peut-être à vous pour (en s'adressant au groupe 2)
388	Laurène B2	à nous
389	Valérie W2	vas y à toi
390	Evelyne C2	il cherche à faire un groupe monophylétique des eucaryotes
391	Professeur	d'accord / donc groupe monophylétique des eucaryotes
392	Evelyne C2	au sein des eucaryotes
393	Professeur	donc ça c'est un de ses objectifs / OK
394	Pierrik W2	retravailler donc la classification antérieure
395	Romina C2	en se basant sur des homologies / enfin des cellulaires moléculaires /
396	Professeur	est-ce que c'est la seule prétention de sa classification ?
397	Romina C2	enfin il parle pas d'homologie il dit en se basant sur des caractères cellulaires et ça sous-entend qu'il soit homologue pour lui les caractères cellulaires c'est peut-être les plus les plus
398	Professeur	d'accord donc les caractères utilisés sont des caractères cellulaires et il suppose que ces caractères sont homologues / pour retranscrire ce que tu dis
399	Romina C2	ouais / ouais c'est ça même s'il ne parle pas d'homologie c'est ce qu'on a compris
400	Professeur	d'accord donc l'homologie serait sous-entendue dans l'histoire et alors par rapport / au problème qu'il cherche à résoudre / lui il est dans quel registre finalement est-ce qu'il / quelles sont les ambitions de sa classification ?
401	Florent W1	les liens de parenté
402	Aude C1	il veut enlever tout ce qui est [
403	? (étudiant non identifié)	polyphylétique]
404	Aude C1	séparations eucaryotes procaryotes animal végétal il veut vraiment classer en global
405	Professeur	et pourquoi / dans quel but ?
406	Aude C1	parce que pour lui tout ce qui a été fait avant c'est insuffisant / c'est pas rigoureux scientifiquement
407	Professeur	et par rapport à quoi c'est pas rigoureux est-ce que?
408	Aude C1	par rapport aux techniques d'observation / à la méthode
409	Professeur	et quel est son but pareil il est dans quel grand registre scientifique qu'est qu'il cherche à faire/ [est-ce que
410	Evelyne C2	à faire de la phylogénie]
411	Professeur	est-ce qu'il est] dans le même registre que Gasparini / est-ce qu'il est dans le même registre que Whittaker ? est-ce qu'il est dans un registre à part ?
412	Romina C2	il veut vraiment faire des groupes monophylétiques alors que Whittaker il ne faisait pas ça il se basait sur des caractères un peu
413	Professeur	dont il veut faire des groupes monophylétiques / oui non je ne sais pas
414	? (étudiant non identifié)	oui
415	Professeur	donc on en est dans quel grand registre / si on est dans l'idée de monophylie et tout ça
416	Pierrik W2	(chuchotant au sein de son groupe) cladistique
417	Valentino W1	la phylogénie
418	Florent W1 (ou Valentino W1?)	moléculaire
419	Professeur	moléculaire
420	Héloïse C3	cytologique
421	Professeur	cytologique / est-ce que la cytologie c'est une ambition de l'observation ?
422	Héloïse C3	non c'est des caractères
423	Professeur	est-ce que c'est une fin ou est-ce que c'est un moyen ?
424	Thomas B1 (et plusieurs autres)	c'est un outil
425	Professeur	c'est un outil mais au service de quoi ?
426	Florent W1	classification les liens de parenté
427	Professeur	alors liens de parenté / est-ce qu'on est d'accord sur le fait que l'idée de lien de

		parenté est dedans ou pas ?
428	Aude C1	rapprocher ceux qui se ressemblent le plus
429	Evelyne C2	il dit que la base de la classification d'utiliser les liens de parenté
430	Professeur	d'accord / donc on utilise on utilise on cherche des liens de parenté dans cette classification / question ouverte hein je cherche juste j'essaie de voir / OK / et donc il utilise pour ça des critères plutôt cytologiques / oui non je sais pas
431	Laurène B2	oui
432	Aude C1	il se base plus à l'échelle de la cellule il ne regarde pas l'organisme de façon globale
433	Professeur	d'accord / donc le cellulaire est primordial apparemment
434	Aude C1	ouais / et le moléculaire
435	Professeur	OK
436	Thomas B1	c'est le début de la phylogénie moléculaire
437	Professeur	alors c'est le début de la phylogénie moléculaire / est-ce que tout le monde est d'accord avec ça ?
438	Thomas B1	peut être que j'ai dit une bêtise
439	Professeur	c'est quoi la phylogénie moléculaire ? enfin juste pour qu'on clarifie c'est quoi pour toi ?
440	Thomas B1	c'est les alignements / les alignements de séquences enfin je ne sais pas s'il mentionne des alignements séquences
441	Aude C1	euh
442	Thomas B1	pas sûr
443	Nombreuses personnes	rire
444	Thomas B1	ouais pas oubliez ce que j'ai dit
445	Héloïse C3	il en utilise un peu en disant que c'est un argument / en disant
446	Evelyne C2	(propos pas audible) cellule / mitochondrial (bribes de mots peu audibles)
447	Professeur	d'accord /
448	Evelyne C2	c'est plus des organites
449	Professeur	juste pour vraiment être sûr sûr le but d'utiliser ces critères cellulaires c'est quoi au final qu'est-ce qu'il veut en faire ?
450	Héloïse C3	bah les utiliser comme critère euh
451	Professeur	comme critère de quoi
452	Héloïse C3	de classification pour donner les classifications alternatives à ce qu'il y avait
453	Professeur	mais une classification qui retrace quoi comme qui reflète quoi qui
454	Marina W3	basé sur les comparaisons
455	Professeur	ça c'est le moyen mais la fin de la classification ? / quelle est quelle est son ambition ?
456	Membre du groupe 2	faire le plus de groupes monophylétiques
457	Professeur	faire le plus de monophylétique possible donc on est bien dans un registre évolutif
458	? (étudiant non identifié)	oui
459	Professeur	d'accord / c'est juste pour être sûr qu'on soit là dedans / OK alors que sont alors que sont les végétaux dans cette classification ? est-ce que vous avez réussi à voir comment il les définissait dans cette classification / ouais [en s'adressant à Manuella qui se porte volontaire pour prendre la parole]
460	Manuella B3	oui euh / donc j'ai dit que / ils sont majoritairement autotrophes mais pas tous donc euh on ne peut pas dire que c'est un groupe monophylétique / si c'est ça
461	Professeur	alors majoritairement autotrophes mais comme ils ne le sont pas tous peut pas dire que c'est un groupe monophylétique
462	Manuella B3	euh / ouais c'est un peu / c'est un peu rapide mais
463	Professeur	est-ce que tu peux préciser un peu ce que tu viens de dire
464	Héloïse C3	ils ne font pas tous forcément de la photosynthèse
465	Professeur	ouais
466	Héloïse C3	donc en ce sens là il ne les classe pas comme un groupe monophylétique / c'est pas un caractère qui pourra / qui pourra les regrouper dans un groupe monophylétique
467	Professeur	alors est-ce que dans un groupe monophylétique tous les représentants de ce groupe possèdent forcément le caractère / possèdent forcément tous le même caractère ?
468	Thomas B1	(chuchotant au sein de son groupe) non

469	Valentino W1	(chuchotant au sein de son groupe) non pas forcément
470	Thomas B1	(chuchotant au sein de son groupe) non des fois / [il peut y avoir des réversions / non je dis des conneries
471	Aude C1	il ne peut pas se baser sur / en tous les cas sur le caractère de la photosynthèse qui est celui qu'on voit] souvent chez les végétaux déterminant / comme tous ne le font pas on ne peut pas se baser exclusivement dessus pour créer le groupe monophylétique des végétaux qui selon lui / enfin qui selon lui est le sens qui a un sens dans la phylogénie
472	Professeur	d'accord donc il cherche à faire un groupe monophylétique il cherche à faire des groupes monophylétiques
473	Aude C1	il aimerait mais euh
474	Professeur	il aimerait
475	Aude C1	mais il se rend compte que par rapport à la photosynthèse qui est le point de départ du groupe il ne peut pas le faire
476	Professeur	d'accord donc finalement pour lui végétaux ils sont photosynthétiques
477	Aude C1	globalement
478	Professeur	mais il ne peut retenir ce groupe là
479	Aude C1	euh / ils sont globalement photosynthétiques et du coup il ne peut pas se baser dessus / d'où après l'utilisation du coup des / des données cellulaires et moléculaires
480	Professeur	d'accord / alors est-ce que juste pour revenir là-dessus est-ce que vous pourriez préciser en quoi / le fait que les végétaux soient globalement photosynthétiques mais pas tous ça ferait qu'ils ne pourraient pas faire un groupe monophylétique / qu'est-ce que vous me dites / qu'est-ce qui est bloquant ? parce que vous avez l'air de dire les végétaux c'est photosynthétique mais je ne peux pas faire un groupe monophylétique parce qu'ils ne le possèdent pas tous / c'est ça ?
481	Plusieurs étudiants	oui
482	Manuella B3	c'est ce qu'il dit
483	Professeur	d'accord donc lui ce qu'il dit c'est ne le possédant pas tous il ne peut pas faire un groupe monophylétique c'est ce qu'il dit textuellement / pour ceux qui l'ont lu peut-être ce serait // donc est-ce que / je vais poser la question autrement / est-ce que les végétaux ont un contour dans cet article est que quand même il définit quelque chose comme étant végétal ?
484	Marina W3	bah oui
485	Professeur	oui / donc c'est sur la base de la photosynthèse
486	Laurène B2	non pas seulement
487	Professeur	pas seulement alors quels sont les autres critères qui sont retenus pour faire un groupe des végétaux ?
488	Evelyne C2	cellulaires
489	Professeur	cellulaires et quels critères cellulaires il retient ?
490	Evelyne C2	la forme des crêtes mitochondriales
491	Professeur	ouais
492	Evelyne C2	par exemple / il a aussi parlé du nombre de membranes plastidiales / structure des flagelles
493	Professeur	et qu'est-ce qu'il retient pour les végétaux dans tout ça ? est-ce qu'il y a des critères cellulaires qu'il retient pour les végétaux dans les crêtes mitochondriales les flagelles et tout ça ?
494	(silence assez long)	
495	Professeur	ça a l'air compliqué manifestement
496	Evelyne C2	les pigments photosynthétiques
497	Thomas B1	vous pouvez reposer votre question s'il-vous-plaît ?
498	(discussion sur ce sujet non audible dans le groupe 2)	
499	Professeur	oui je voudrais juste savoir si finalement il fait un groupe des végétaux en disant qu'ils sont photosynthétiques mais peut-être pas tous finalement qu'est-ce qu'il retient pour définir les végétaux est que c'est un groupe qu'il définit finalement autrement que par la photosynthèse ou pas ?
500	Aude C1	pas vraiment / enfin moi j'ai pas trouvé que spécialement il le définissait
501	Professeur	d'accord c'est pas défini / est-ce que pour d'autres / c'est valable pour tout le monde est-ce que c'est un groupe qu'est pas défini dans son article ?

502	Romina C2	si c'est défini / il regroupe les différents groupes selon des critères mais on les a pas notés donc on ne se souvient plus trop ce qu'il y avait
503	Professeur	d'accord donc euh / c'est un peu flou / c'est /
504	Héloïse C3	non c'est pas clair
505	Professeur	j'laisse ça /
506	Groupe 2	(chuchotement pas audible)
507	Professeur	je laisse ça comme ça / vous n'avez pas de / rien d'autre à dire sur la définition des végétaux dans ce système là ce qu'il y a des règnes ? / est il y a des
508	Laurène B2	oui
509	Héloïse C3	oui les quatre [groupes
510	Evelyne C2	il y a trois groupes]
511	Aude C1	il y a que quatre groupes
512	Professeur	et parmi ces règnes est-ce que certains sont végétaux ou pas / est-ce qu'il dit est-ce qu'il regroupe ces règnes là en ensembles ou la
513	Evelyne C2	il a six règnes
514	Professeur	ouais
515	Evelyne C2	enfin nous on en a compté six il y en a trois qui sont / qui font partie des végétaux
516	Professeur	d'accord donc ça quand même un contour du coup
517	Evelyne C2	ouais il y a les viridiplantae les biliphyta et les chromista / dans le / groupe qu'il a subdivisé en cryptophyta et chromophyta
518	Professeur	donc il y a trois règnes qui définissent les végétaux tout en ayant d'un côté en disant qu'on ne peut pas faire un groupe monophylétique des végétaux c'est ça ? non je ne sais pas j'essaie juste de / de voir parce que plutôt vous m'avez dit que
519	Romina C2	bah ça veut pas forcément dire que les trois groupes ont un ancêtre commun mais ça il n'en parle pas vraiment c'est ça qui nous a posé problème parce qu' il dit qu'il y a trois groupes monophylétiques / mais après est-ce / est-ce qu'on / est-ce que que ça forme après un groupe monophylétique ces trois groupes là ? nous on a plutôt pensé que non mais sans que ça soit vraiment marqué explicitement
520	Professeur	OK / très bien / alors question par rapport aux euglènes est-ce qu'elles seraient végétales dans cette classification et pareil pour les diatomées ou pas ?
521	Aude C1	les euglènes non
522	Professeur	alors les euglènes non
523	Aude C1	parce rangées chez les pro /protozoaires
524	? (étudiant non identifié)	protiste ouais
525	Professeur	d'accord / donc euglènes protozoaires donc ce serait pas des végétaux et est-ce que vous rappelez des arguments en faveur de ça
526	Aude C1	euh (lisant ses notes) parce que il y aurait phagotrophie / euh
527	Héloïse C3	en relation avec les autres protozoaires
528	(silence)	
529	Professeur	OK phagotrophie et puis les diatomées ?
530	Aude C1	euh oui / j'ai mis oui parce que
531	Manuella B3	chromophytes
532	Aude C1	parce que c'est pris dans les chromophytes
533	Professeur	d'accord chromophytes donc végétaux / OK / alors quelles sont / par rapport aux autres systèmes de classification antérieurs / alors est-ce qu'il s'y oppose et comment si c'est le cas
534	Groupe 2	il s'y oppose
535	Professeur	alors il s'y oppose il s'y oppose sur quelle base / aux systèmes précédents
536	Evelyne C2	les critères taxonomiques de Whittaker et Margulis qui sont basés sur des critères écologiques d'après lui
537	Professeur	d'accord / ouais et en quoi c'est un problème pour lui que les critères soient écologiques
538	Evelyne C2	bah ça forme trop de groupes polyphylétiques
539	Professeur	d'accord OK donc rejette les critères écologiques parce que ça ne forme pas des groupes monophylétiques
540	Evelyne C2	entre autre
541	Professeur	OK / est-ce que vous y avez vu d'autres oppositions à d'autres systèmes antérieurs ou d'autres problèmes qui est évoqués ?

542	Evelyne C2	à celui de Dodson aussi à deux règnes il s'oppose à celle-là aussi
543	Professeur	d'accord
544	Aude C1	à celui de Jeffrey et Edwards où là les euglènes sont pris dans les plantes
545	Professeur	oui / d'accord et quel était son argument en faveur de ça ? // en quoi c'était problématique que ce soit pris dans les plantes est-ce qu'il évoque ça quelque part ?
546	Aude C1	euh / attendez / parce que euh (silence) parce qu'avec il mettait aussi des eufungi et euh (silence)
547	Professeur	si c'est pas clair c'est pas clair hein
548	(silence)	
549	Professeur	alors lui vous m'avez dit qu'il utilisait plutôt des critères cellulaires est-ce que vous pouvez me dire pourquoi ils jugent pertinents ces critères là / ou pas selon lui ? est-ce qu'il justifie ce choix là d'utiliser des critères cellulaires ou pas ?
550	Florent W1	pour lui c'est beaucoup plus rigoureux
551	Professeur	alors en quoi c'est plus rigoureux / qu'est ce que / quelle est l'idée de rigueur dans son raisonnement ?
552	Evelyne C2	ce sont des caractères / des caractères d'aspect conservatif de / en gros pour lui les critères cellulaires sont des critères qui sont conservés par les organismes donc du coup c'est la base de / des critères qu'on devrait utiliser pour classer les organismes
553	Professeur	d'accord et je pousse ma question jusqu'au bout en quoi le fait que ce soit conservé ce serait ce serait bien (mots peu audibles)
554	Florent W1	pour les liens de parenté
555	Professeur	pour établir des liens de parenté / d'accord / OK / donc ça nous pousse à l'item suivant qui est de savoir est-ce qu'il utilise l'homologie ou pas comment est-ce qu'il l'utilise / est-ce que / est-ce que c'est quelque chose qui est cité l'homologie est-ce que c'est quelque chose qui est utilisé par lui / est-ce que c'est
556	Aude C1	bah il n'en parle pas / il ne parle pas d'homologie en soi
557	Professeur	d'accord il cite pas
558	Aude C1	non
559	Professeur	est-ce que c'est parce que c'est pas cité que ce n'est pas mobilisé
560	Thomas B1 (avec plusieurs personnes)	non
561	Professeur	est-ce que vous pensez que ça l'est ou pas et pourquoi
562	Thomas B1	il parle de groupe monophylétique donc euh
563	Valentino W1et Aude C1	oui il parle de groupes monophylétiques
564	Thomas B1	donc cela suppose une hypothèse d'homologie quoi
565	Aude C1	il n'emploie pas le terme d'homologie
566	(en parallèle discussion au sein du groupe 2, chuchotements non audibles)	
567	Professeur	mais dès l'instant où il construit des groupes monophylétiques de fait il utiliserait des homologies a priori
568	Aude C1	oui
569	Professeur	d'accord / vas y vas y peut être (en s'adressant à quelqu'un du groupe 2 qui chuchotait)
570	Evelyne C2	on parlait justement (petit rire de Laurène) / elle n'était pas d'accord sur le fait qu'il utilise des caractères qu'on conserve car du coup on ne voit pas d'évolution c'est ça (en s'adressant à Laurène)
571	Professeur	ouais alors va jusqu'au bout de ta pensée c'est intéressant
572	Laurène B2	du coup je me demandais comment est-ce qu'il faisait parce que / si on ne regarde que les caractères / sans modification / comment est-ce qu'on peut
573	Professeur	conservés
574	Laurène B2	oui voilà / comment est-ce qu'on peut former des
575	Professeur	alors est-ce que peut être qu'il veut dire des caractères qui ne sont pas modifiés du tout ou des caractères qui sont relativement peu modifiés ou / bon ça on ne sait pas trop / OK / donc il y a une prétention d'utiliser l'homologie a priori dans cette classif ?
576	Evelyne C2	oui
577	Professeur	ouais / bon
578	Thomas B1	le fait de vouloir faire des groupes monophylétiques ça /enfin

579	Professeur	ouais
580	Thomas B1	on pose l'hypothèse d'homologie primaire quand même
581	Professeur	d'accord on pose une hypothèse d'une homologie primaire / alors est-ce qu'il argumente le fait que ce soit des homologies primaires [même si c'est pas cité hein
582	Thomas B1	ça je sais pas]
583	Professeur	est-ce qu'il avance des arguments qui font penser que c'est des homologies
584	Thomas B1	il parle de la méthode phylogénique un peu / cladistique un peu
585	Aude C1	pas spécialement
586	Thomas B1	non bon
587	Professeur	vous ne voyez rien de plus à rajouter là-dessus
588	(petit rire dans le groupe 1)	
589	Valentino W1	c'est la meilleure (en parlant d'Aude ?)
590	Thomas B1	la réponse me paraît adaptée
591	Professeur	et est-ce que pareil il y a une méthodologie particulière qu'il emploie en fait / comment est-ce qu'il se base pour faire ces groupements
592	Aude C1	ben alors là on voit justement que par rapport à la frise qui nous avait été donnée avec différentes classifications et les avancées technologiques on voit que par rapport à Whittaker il y a eu de nombreuses nouvelles techniques qui sont entrées sur le marché (fait des guillemets avec ses mains) je dis ça comme ça (petit rire) / et que du coup il utilise vraiment ces nouvelles technologies comme la microscopie les microprocesseur analyse moléculaire et séquençage / et qu'en fait du coup c'est une classification qui est en accord avec son temps
593	Professeur	alors est-ce que lui il a vraiment utilisé analyse moléculaire et séquençage
594	Aude C1	alors il reconnaît qu'il s'en est servi en partie mais il dit justement que pour / les études à venir il faudra s'intéresser plus aux études moléculaires / il donne déjà des pistes en disant que son étude va pouvoir être affinée par les études moléculaires
595	Professeur	d'accord / dans les perspectives
596	Aude C1	voilà
597	Professeur	mais lui par rapport à ce qu'il fait
598	Héloïse C3	il en a utilisé une comme argument qui s'appuie il dit que ça concorde avec ma / avec ma classification avec mes règnes / du coup c'est un argument qui appuie son [
599	Professeur	d'accord]
600	Héloïse C3	sa classification
601	Professeur	mais sa méthodologie propre lui
602	Héloïse C3	non / lui il / enfin
603	Professeur	il se base sur quoi finalement / enfin qu'est-ce qu'il fait
604	Aude C1	sur la structure cellulaire
605	Professeur	structure cellulaire / il fait des groupements juste comme ça sur la base de la ressemblance
606	Aude C1	mais aussi sur les pigments photosynthétiques / il en parle
607	Professeur	d'accord
608	Chercheur	excuse moi j'ai mal entendu / Héloïse C3 tu peux redire ce que tu disais j'ai commencé à taper tu dis il a utilisé ?
609	Héloïse C3	il a utilisé des données de séquences sur le cytochrome C par exemple qui lui a donné des arguments pour confirmer sa classification en cinq règnes / ça concorde ça appuie enfin ça appuie sa classification mais il ne s'est pas basé dessus pour le faire
610	Professeur	d'accord / OK
611	Chercheur	et après du coup j'ai raté quelque chose / vous avez fait un petit bilan j'ai l'impression
612	Professeur	non non je redemandais globalement / globalement sur quoi il s'est appuyé pour faire ses pour faire ses regroupements on est arrivé au fait qu'il utilisait des caractères cellulaires
613	Chercheur	d'accord
614	Professeur	pour regrouper
615	Héloïse C3	du coup il est conscient que ce sera probablement une classification à adapter selon les nouvelles données qui vont
616	Professeur	d'accord / autre chose à rajouter sur ça / on passe à la dernière à Burki / donc bah même question est-ce que vous avez dégagé je repasse à vous (groupe 3) / est-ce

		que vous avez dégagé les objectifs des classifications de la classification qui est évoquée
617	Manuella B3	ce serait classer les eucaryotes en fonction de critères morpho-anatomiques et moléculaires // et moléculaires / trouver une position possible de la racine de cet arbre
618	Professeur	ouais
619	Manuella B3	euh de trouver aussi / enfin de comprendre leur histoire évolutive / aux eucaryotes
620	Professeur	d'accord
621	Manuella B3	les liens de parenté entre différents sous-groupes qui composent les eucaryotes / et du coup d'évaluer un peu la méthode phylogénomique de / de notre temps
622	Professeur	d'accord / donc globalement même question que par rapport aux autres systèmes de classif quelle est l'ambition en fait / on est donc un grand registre dans quel grand champ de la biologie ? est-ce que c'est de l'écologie est-ce que c'est de la physiologie / qu'est-ce qu'il cherche à faire en fait ? / ce que tu as dit j'ai rien à dire là-dessus mais c'est juste pour prendre la distance par rapport par rapport à ça / quel grand objectif en fait ?
623	Thomas B1	si je dis phylogénie c'est ridicule ou pas ?
624	(petit rire du groupe 1)	
625	Professeur	bah non / y'a rien de ridicule
626	Thomas B1	c'est clairement un but de classer
627	Professeur	d'accord
628	Laurène B2	établir des liens
629	Thomas B1	oui établir des liens de parenté
630	Professeur	d'accord / alors quand tu dis c'est clairement un but de classer c'est-à-dire obtenir des liens de parenté est-ce qu'on classe que selon les liens de parenté ? // enfin en tout cas établir des liens de parenté d'accord / d'accord alors que sont les végétaux dans cette classification là ?
631	Manuella B3	c'est les organismes photosynthétiques qui possèdent des plastes / unicellulaires ou pluricellulaires
632	Professeur	alors ça c'est mentionné en tant que tel ou c'est une inférence que tu fais toi ?
633	Thomas B1	ben nous on a eu un petit débat interne / (rire d'Helena) en fait le groupe végétaux il n'est jamais mentionné dans l'article / jamais / il n'est jamais mentionné dans l'article il n'a pas de caractéristiques qui sont vraiment données proprement
634	Professeur	d'accord
635	Aude C1	c'est un [groupe polyphylétique
636	Professeur	est-ce qu'au moins vous êtes d'accord tous] sur le fait que le groupe ne soit pas mentionné ?
637	Plusieurs personnes	oui
638	Professeur	est-ce que ça c'est quelque chose de consensuel ?
639	Florent W1	ouais
640	Professeur	alors du coup / sur quoi tu t'es basée pour dire organismes photosynthétiques / il y a plastes et cetera / qu'est-ce que t'as fait pour dire ça ?
641	Manuella B3	euh / je sais plus / bah / j'sais plus dans une phrase il parlait des plastes et / des algues vertes
642	Professeur	mais est-ce que c'est quelque chose qu'il y avait d'écrit dans le texte ou c'est toi qui regardant ce texte a essayé de de retrouver quelque chose que tu connaissais
643	Manuella B3	oui j'en ai déduit ça / il y avait pas / ouais c'est plutôt / la deuxième euh / enfin c'est c'est pas / il y a pas une phrase une définition claire des végétaux
644	Professeur	d'accord donc pour toi pour que tu dises ça / tu te bases par rapport à [quoi
645	Manuella B3	à partir de]
646	Professeur	de tes connaissances ? de l'idée que tu t'en fais ?
647	Manuella B3	oui bah oui de nos connaissances mais aussi de certains termes qu'il utilise du coup / parce qu' il parle de plastes donc tout de suite effectivement je vais mettre cela dans la définition
648	Professeur	alors faudrait peut être qu'on s'entende / qu'est-ce qu'on met dans cette case / est-ce qu'on met finalement végétaux égal rien / est-ce qu'on met végétaux égal quelque chose / qu'est-ce qu'on fait ?
649	Thomas B1	bah le terme végétaux étant pas utilisé / par rapport à Burki lui-même c'est un peu

		étonnant / après c'est sûr vis-à-vis de nos connaissances / enfin on peut dire c'est un groupe polyphylétique étant donné que / mais après enfin après ça dépend des caractéristiques qu'on lui donne à ce groupe aussi enfin c'est un peu / effectivement si on dit un organisme photosynthétique qu'a des plastes blablabla on va retrouver / dans ces cas-là des végétaux on va en retrouver partout que ce soit chez les SAR que ce soit chez les excavates enfin on va en retrouver partout
650	Professeur	ouais
651	Thomas B1	du coup / en fait le groupe
652	Professeur	et l'auteur lui / c'est ça qui nous intéresse finalement on essaie de retranscrire ce que nous dit un auteur sur la classification / est-ce que cet auteur là / pour lui végétaux a une existence est-ce que c'est mentionné est-ce qu'il le définit est-ce que / oui (s'adressant à Thomas qui veut prendre la parole)
653	Thomas B1	bah après c'est sûr que si on compare par rapport à Whittaker et à ses trois grands règnes supérieurs qui sont animaux fungi et plantae / les animaux et les fungi on les retrouve chez les opisthocontes mais les végétaux ils sont complètement éclatés maintenant / si on se base là-dessus / dans les végétaux de Whittaker il y avait / enfin je peux voir l'image / (tourne les pages de l'article de Whittaker) / par exemple dans les plantae de Whittaker il y avait les phéophytes par exemple qu'on retrouve aujourd'hui chez straménophiles
654	Florent W1 (?)	piles
655	Thomas B1	straménopiles pardon / ah oui straménopiles
656	Professeur	OK
657	Thomas B1	voilà les charophytes aussi il n'y sont plus je crois
658	Professeur	mais là ils ne sont pas expressément mentionnés
659	Laurène B2	ah s'ils ne sont pas mentionnés [c'est que
660	Romina C2	pour lui ça n'existe pas]
661	Laurène B2	pour lui ça n'existe pas oui
662	Thomas B1	d'autant plus que après on verra / cela répondra peut être à la question d'après
663	Professeur	je ne suis pas en train de prendre parti en quoi que ce soit je veux juste savoir si je mets rien ou si je mets quelque chose
664	Laurène B2	pour moi ce serait rien
665	Thomas B1	ouais pour moi aussi
666	Professeur	(s'adressant à Manuella) alors et toi est-ce que tu veux mettre quelque chose puisque c'est toi qui nous a donné une définition / est-ce que t'as envie de mettre quelque chose ou pas
667	Héloïse C3	(chuchotant à son groupe) du fait qu'il parle pas des végétaux est-ce que ça le euh
668	Manuella B3	forcément les végétaux existent pour lui on est en 2014 / mais il n'en parle pas / enfin explicite / voilà
669	Professeur	est-ce que ça existe pour lui / ou est-ce que ça
670	Manuella B3	un groupe monophylétique non / mais les végétaux existent / enfin je pense (petit rire)
671	Professeur	et selon les critères qu'il utilise est-ce que ça exise ?
672	Manuella B3	oui
673	Professeur	ou pas ?
674	Manuella B3	oui //
675	Professeur	si on prend [le but de départ de la classif quel était le but de la classif ?
676	Manuella B3	c'est bizarre d'hésiter parce que c'est tellement
677	(discussion en parallèle au sein du groupe 3 pendant que le professeur parle)	
678	Benoît W3	justement il disait que / les végétaux c'était fini quoi
679	Manuella B3	ah ouais ?
680	Héloïse C3	ils ont quitté du vocabulaire en fait]
681	Thomas B1	placer les eucaryotes et placer une racine à son groupe
682	Professeur	placer les eucaryotes les uns par rapport aux autres et placer une racine
683	Thomas B1	c'est clairement dit dans son introduction c'est ce qu'il veut
684	Professeur	d'accord / et on avait dit a priori il faisait / il voulait faire de la phylogénie
685	Thomas B1	ouais
686	Professeur	OK / donc par rapport à ça qu'est-ce que je mets ? je veux juste une réponse maintenant je voudrais que vous mettiez d'accord pour voir ce que j'écris
687	Thomas B1	bah le truc c'est qu'on n'est pas d'accord

688	Professeur	on laisse le désaccord apparent
689	Thomas B1	bah je sais pas mais pour moi les végétaux il n'en parle absolument pas et euh / il a un groupe qui peut / enfin si on globalise / il un groupe qui ressemble le plus aux végétaux c'est les archaeplastida / mais comme il parle pas de végétaux / on ne peut pas dire que ce sont les végétaux en tant que tel on a envie c'est sûr on a envie / la branche elle est verte on voit qu'il y a un maximum de choses qu'on appelle les végétaux là dedans il y a les gymnospermes les angiospermes les bryophytes ceux qu'on connaît le plus
690	Helena B1 (au sein du groupe 1, mais qui avait travaillé sur Burki avec Manuella B3 et Karima B2)	c'est pas ce qu'on dit non plus
691	Thomas B1	bah non
692	Helena B1	on dit pas le vert c'est les végétaux
693	Thomas B1	mais non mais non j'vous arrête pas à ça / non mais c'est vrai que la façon dont c'est mis ça donne envie
694	Valentino W1	c'est vrai que ça donne envie
695	Thomas B1	parce que je sais que moi j'ai eu tendance à faire cette confusion mais en fait comme le terme de végétaux est pas explicité
696	Groupe 3	(discussion au sein du groupe pendant l'échange précédent)
697	Benoît W3	je pense que ce que tu voulais dire c'est que d'un point de vue classement phylogénétique machin les végétaux ça ne peut pas exister scientifiquement parlant mais lui il sait qu'il y a des groupes qui qui
698	Héloïse C3	il ne dit pas que ça n'existe pas il dit que le terme du coup ça ne peut pas exister vu leur
699	Manuella B3	oui ça dépend / comment on formule euh
700	Benoît W3	c'est ça que t'as voulu dire je pense
701	Manuella B3	ben euh c'est les / c'est les organismes photosynthétiques / après]
702	Professeur	donc je laisse le désaccord mais que certains ne veulent pas mettre végétaux qu'i n'y a rien et que d'autres pensent quand même que végétaux même s'il n'est pas explicité dans la classification existe malgré tout au regard de l'auteur
703	Benoît W3	en fait il a voulu le redéfinir donc en fait il part de ce que l'on appelait avant les végétaux et il sait que / euh comment dire / pour lui ça s'appele plus les végétaux par ce que ce qu'on appelait végétaux avant c'était des groupes polyphylétiques / donc ça peut pas pour lui ça n'a pas de valeur scientifique / ça n'a pas de valeur de classification
704	Professeur	d'accord
705	Héloïse C3	c'est pour ça qu'il n'en parle pas / mais du coup ouais / j'suis assez d'accord
706	Thomas B1	et c'est un peu aussi la base de de sa méthode dans ce que dit Benoît W3 quand il dit il part de ce qu'on sait avant / c'est vrai qu'il s'est beaucoup basé sur les classifications antérieures et ensuite il les a modifiées par rapport aux données phylo comme il dit phylogénomiques qu'il a
707	Professeur	d'accord / d'ailleurs petite parenthèse peut être est-ce que c'est lui qui les a vraiment modifié les classif en question / dans l'article est-ce qu'il a construit une classification vraiment ou est-ce que c'est une synthèse de / de travaux d'autres ou ? est-ce que la classification que vous avez sous les yeux
708	Thomas B1	elle a été inspirée / à la fin il y a marqué this figure was inspired by a template provided by Y. Eglit
709	Professeur	d'accord donc c'est une synthèse qu'il fait / une sorte d'état de l'art des classifications les plus récentes en fait
710	Héloïse C3	c'est une revue oui
711	Professeur	OK bon bah on va (en montrant la question suivante sur le tableau de bilan projeté)
712	Helena B1	du coup après les questions on n'est pas d'accord non plus
713	Professeur	ah bah oui forcément (petit rire)
714	Plusieurs étudiants	(rire-

715	Professeur	ça va être un petit peu en contradiction du coup on va maintenir les désaccords hein / on va mettre ce que pensent les uns et ce que pensent les autres / donc du coup est-ce que / est-ce que l'euglène serait végétale dans la classification ?
716	Helena B1	bah oui
717	Manuella B3	oui
718	Valentino W1	oui et non
719	Professeur	donc oui si vous avez répondu que les végétaux y étaient toujours
720	Thomas B1	nous on a dit que l'on ne pouvait pas répondre
721	Professeur	et vous vous avez dit qu'on ne pouvait pas répondre
722	Thomas B1	on a dit c'est pas / enfin / après ouais non / on a dit qu'on ne pouvait pas répondre c'est un excavate qui a un plaste d'origine algue verte / c'est un protiste photosynthétique / c'est ce qui est dit dans le texte mais après
723	Groupe 3	(discussion au sein du groupe pendant l'échange précédent)
724	Héloïse C3	moi j'suis plutôt d'accord avec eux
725	Benoît W3	moi aussi
726	Héloïse C3	(propos pas audible puis rire)
727	Manuella B3	Helena B1 et moi du coup on a dit oui
728	Benoît W3	c'est vrai / c'est vrai que s'il n'y a pas de végétaux
729	Manuella B3	ouais
730	Marina W3	pour moi il y a des végétaux c'est juste qu'ils ne s'appellent pas / végétaux / mais [
731	Manuella B3	oui confirmation]
732	Marina W3	le terme n'est pas le même mais]
733	Professeur	J'imagine que la réponse est similaire pour les diatomées
734	Florent W1	oui
735	Thomas B1	c'est exactement / c'est juste que c'est pas
736	Florent W1	c'est pas le même groupe c'est des SAR
737	Valérie W2	nous c'est pareil parce que c'est les binômes de
738	Chercheur	vous vous êtes plutôt sur la position du groupe 3
739	Valérie W2	on a les deux en fait / on a un de chaque
740	Héloïse C3	bah on a un peu de désaccord ici aussi en fait
741	Thomas B1	en fait c'est / moi j'étais avec Laurène en binôme donc on avait cette impression là mais Helena et Manuella étaient en binôme du coup avec Helena bon s'est un peu tapé dessus mais
742	Chercheur	donc c'est pas oui pour le groupe 3 et non pour le groupe 1 si je comprends bien
743	Héloïse C3	non / parce que même au sein du groupe trois
744	Valentino W1	c'est oui ou non selon les binômes
745	Chercheur	c'est oui ou non selon les binômes
746	Plusieurs étudiants	oui c'est ça (rire)
747	Chercheur	d'accord
748	Thomas B1	de la façon dont on a lu l'article et dont on a interprété
749	Helena B1	après / c'est de l'anglais!
750	Thomas B1	après c'est (rire)
751	Chercheur	peut-être pour de qui est pour oui et qui est pour non / vous pouvez lever la main ceux qui sont pour oui ?
752	Plusieurs étudiants	pour oui quoi ?
753	Chercheur	l'euglène est végétale ?
754	Manuella B3	rire en levant la main en mettant que Pierrik et Helena
755	Chercheur	il y a combien de personnes qui lèvent la main ?
756	Manuella B3	trois (petit rire)
757	Valentino W1	en fait c'est juste un seul binôme
758	Benoît W3	y'a aussi des je sais pas parce que on sait pas
759	Professeur	c'est pas pas une honte hein
760	Chercheur	c'est pas une honte / c'est pour comprendre
761	Thomas B1	mais non c'est juste pour compter
762	Professeur	c'est histoire de / c'est juste pour comprendre
763	Chercheur	si on discute de ça c'est qu'il n'y a pas une solution simple sinon

764	Helena B1	le problème c'est que les autres ils n'ont pas lu le texte
765	Valérie W2	oui c'est le trinôme qui était ensemble et le binôme qui sont contre
766	Professeur	d'accord et vous êtes restés sur vos positions par rapport à / d'accord
767	Laurène B2	nous notre position c'est qu'on peut pas répondre
768	Thomas B1	parce qu'on n'y allait pas dans une démarche de convaincre l'autre
769	Laurène B2	ben non
770	Chercheur	je ne suis pas sûr d'avoir compris
771	Etudiants	(rire)
772	Professeur	en fait il y a un binôme est un trinôme qui ont lu le texte
773	Chercheur	ouais
774	? (étudiant non identifié)	voilà
775	Professeur	il y a un trinôme donc / Manuella Karima et Helena qui étaient pour le fait que les végétaux ont une définition et donc elles restent sur cette position là / il y avait donc Laurène et Thomas qui étaient sur une autre sur une autre ligne en lisant le texte et qui sont aussi sur cette position là et c'est majoritairement eux qui s'expriment maintenant / est-ce que j'ai traduit les choses ?
776	Thomas B1	ça me parait assez juste ouais
777	Héloïse C3	parfait
778	Professeur	OK / alors tchac tchac tchac / du coup ce sera peut être plus consensuel est-ce que l'auteur s'oppose des classifications antérieures ou pas / est-ce que vous avez vu des choses comme ça
779	Laurène B2	oui
780	Thomas B1	oui
781	Professeur	et sur quoi il s'oppose qu'est-ce que vous avez vu comme / comme rupture par rapport aux autres ?
782	Thomas B1	là par contre on était assez d'accord en général il invalide le terme de règne utilisé par Copeland Whittaker et Margulis / qui a été mis en place par des comparaisons morphologiques et modes de nutrition comme on l'a vu avant
783	Professeur	et en quoi cela pose des problèmes selon lui ?
784	Thomas B1	en fait au vu de toutes les nouvelles données apportées et les comparaisons qu'il a pu faire avec / enfin les données phylogénomiques donc l'alignement de milliers / de centaines de milliers de séquences / pour lui c'était plus valable
785	Professeur	d'accord OK
786	Thomas B1	et du coup il utilise le terme de super groupe pour répondre à votre question
787	Professeur	donc il propose super groupe à la place de / des règnes classiquement distingués / d'accord / est-ce que vous avez vu d'autres positions à des systèmes antérieurs ?
788	Thomas B1	il remet aussi en cause la / la classification des protistes comme organismes simples par Haeckel / parce que il dit que cela induit une pensée gradiste dans le sens où il y aurait des organismes simples et complexes
789	Professeur	d'accord OK / d'accord // alors ensuite on va regarder par quoi il justifie ses choix de classification lui / donc il s'oppose à d'autres mais finalement comment il / sur quoi il base sa construction / quelle est son / sa motivation la justification de son choix de retenir cette classification / pourquoi est-ce que cette classif serait une bonne classif alors que les précédentes ne le sont pas finalement ?
790	Benoît W3	parce qu'elles sont / elles sont basées le plus / enfin beaucoup plus sur des données moléculaires
791	Professeur	d'accord sur des données moléculaires qui apporteraient quoi ces données moléculaires ? il y a une magie du moléculaire ou ?
792	Thomas B1	un nombre de caractères plus important étant donné qu'en utilisant les données moléculaires il n'annule pas non plus euh / les analyses phylogénétiques précédentes qui étaient plutôt basées sur des caractères anatomiso-morphologiques
793	Professeur	ouais
794	Thomas B1	du coup c'est-à-dire comme il est / enfin dans son raisonnement le sentiment qu'on avait c'était que qu'il partait de ces anciennes classifications et qu'il faisait une synthèse avec les données phylo phylo phylogénomiques enfin / et que du coup cela aboutissait à sa figure
795	Professeur	donc grand nombre de caractères ça semble être quelque chose d'important dans son / dans la justification de son choix / du fait que de se baser sur des caractères

		moléculaires ce serait meilleur / en tout cas pour partie / d'accord avec ça ? / autre chose à rajouter ? / alors est-ce que il utilise l'homologie dans cette classification ou pas ?
796	Thomas B1	c'est pas mentionné texto
797	Professeur	c'est pas mentionné textuellement est-ce que malgré tout vous le pensez ou pas ?
798	Thomas B1	oui
799	Helena B1	c'est opposé à l'orthologie en fait qui est non héritée d'un ancêtre commun
800	Professeur	opposé à l'orthologie alors est-ce que tu peux définir ce terme là
801	Helena B1	bah c'est lui hein qui dit qu'il faut faire attention à pas confondre / les deux
802	Thomas B1	c'est un transfert vertical l'orthologie donc
803	Professeur	alors ça c'est un autre problème / c'est un biais potentiel de reconstruction avec les méthodes phylogénétiques quand on prend pas des gènes orthologues on peut avoir des biais mais ça c'est un / il fait mention d'un artefact auquel il faut faire attention mais c'est pas euh / ça ne traduit pas la manière dont il utilise directement l'homologie ou pas
804	Helena B1	oui mais du coup vu qu'il dit pas clairement homologie / euh par le fait qu'il / qu'il dise que l'orthologie n'est pas héritée d'un ancêtre commun / on en déduit que l'homologie bon quand même c'est basé sur ça
805	Professeur	oui / est-ce que vous n'avez pas d'autres critères qui vous diraient si à votre avis l'homologie est mobilisée ou pas ?
806	Thomas B1	après dans son objectif enfin il est parti sur un objectif de phylogénie
807	Professeur	ouais
808	Thomas B1	et donc sur d'hypothèse d'homologie primaire [
809	Professeur	ouais]
810	Thomas B1	si je dis pas de bêtise et du coup / ben il y répond plus ou moins en faisant ces groupes et même si il ne mentionne pas le terme de synapomorphie après par exemple pour le groupe des archaeplastida il parle de la présence d'un plaste qui résulte du phénomène d'endosymbiose unique / et il dit que ce serait / enfin il sous-entend que ce serait la synapomorphie du groupe / malgré tout / enfin / il est sur cette façon de classer donc euh
811	Professeur	d'accord / est-ce qu'il y a pas autre chose qui finalement dans la méthodologie qu'il évoque laisserait entendre qu'il a utilisé l'homologie ? / qu'est-ce qu'il a fait est-ce qu'on peut peut-être / dans la méthodologie ?
812	Thomas B1	dans les alignements vous voulez dire ?
813	Professeur	ouais / dans les alignements qu'est-ce qu'on fait quand on aligne ?
814	Valentino W1	ben on sous-entend que c'est homologue
815	Thomas B1	bah on dit que chaque position est un caractère
816	Professeur	ouais / et qu'est-ce qu'on suppose de ce caractère si on aligne ?
817	Laurène B2	qu'il est homologue
818	Professeur	qu'il est homologue / donc quelque part qui dit comparaison de données de séquence dit forcément qu'il a mobilisé euh / qu'il a forcément mobilisé l'homologie
819	Thomas B1	oui c'est vrai
820	Professeur	alors est-ce que / est-ce qu'il est allé plus loin à votre avis que cela parce tu parlais de synapomorphie / est-ce que c'est pareil qu'homologie ou pas ou ? / quelle méthode il a utilisé lui précisément ? qu'est-ce qu'on vous dit des méthodes ? [
821	Benoît W3	alignement]
822	Professeur	peut-être pour revenir un peu en arrière
823	? (étudiant non identifié)	phylogénomique
824	Professeur	phylogénomique / est-ce que vu ce que c'était que la phylogénomique ?
825	Benoît W3	il a aligné des dizaines de milliers de séquences génétiques
826	Professeur	d'accord / OK / est-ce qu'on sait comment il les a traité derrière ces séquences / qu'est-ce que / qu'est-ce qu'il aurait pu utiliser comme méthode pour traiter ces séquences / c'est plus d'après vos connaissances / classiquement qu'est-ce qu'on en fait des séquences
827	Laurène B2	on prend la moindre distance
828	Professeur	est-ce que c'est la seule possibilité de grouper par distance ?
829	Thomas B1	ou par ressemblance
830	Valentino W1	méthode UPGMA

831	Professeur	est-ce que vous vous rappeler des grandes méthodes qui permettent de traiter des données moléculaires ?
832	Laurène B2	phénétique
833	Professeur	phénétique / est-ce que c'est la seule est encore utilisé actuellement cette méthode ?
834	Laurène B2	[probabiliste
835	Marina W3	y'a la méthode] probabiliste
836	Professeur	probabiliste / et puis quoi d'autre encore pour traiter des données moléculaires ?
837	Marina W3	(chuchotant dans son groupe) y'a cladistique phénétique et probabiliste
838	Professeur	ouais cladistique / aussi / donc on peut utiliser des méthodes cladistique des méthodes phénétiques des méthodes probabilistes / alors phénétique c'est plus trop utilisé / même plus du tout / cladistique / ça présente aussi des biais / on utilise plutôt actuellement des méthodes probabilistes / méthodes probabilistes qui sont des filles si j'ose dire des méthodes cladistiques / un dérivé de méthodes cladistiques quelque part / si je dis méthodes probabilistes et que c'est dérivé de méthodes cladistique qu'est-ce que cela implique la cladistique / pour le traitement de l'homologie ?
839	Benoît W3	oui
840	Professeur	donc on utilise des homologies mais qu'est-ce qu'on en fait de ces homologies ?
841	Valentino W1	on les confirme
842	Laurène B2	on les teste
843	Valentino W1	[on les teste
844	Thomas B1	on les teste] / on fait des hypothèses d'homologie
845	Professeur	on les teste et avant de les tester pour les tester / pour en arriver au test qu'est-ce qu'on a fait de ces homologies ?
846	Benoît W3	on va d'abord penser qu'elles sont toutes enfin que ce sont des homologies primaires /l'hypothèse d'homologie
847	Professeur	ça d'accord on fait une hypothèse d'homologie
848	Benoît W3	on va comparer ces caractères là avec les différences dans les séquences / en incluant justement la probabilité qu'un nucléotide soit
849	Professeur	pour en rester sur de la cladistique simple / qu'est-ce qu'on fait avec des données alignées sur lesquelles on a fait une hypothèse d'homologie primaire / ensuite qu'est-ce qu'on fait ?
850	Héloïse C3	on déduit des pourcentages de similarité de
851	Professeur	ça c'est la [cladistique ?
852	Valentino W1	ça c'est UPGMA]
853	Laurène B2	non / on / on code
854	Professeur	(répondant à Héloïse C3) ça c'est de l'UPGMA mais si on veut faire de la cladistique
855	Benoît W3	bah on les compare
856	Professeur	on code par rapport à un groupe externe
857	Héloïse C3	ah oui d'accord
858	Professeur	on fait un codage / et qu'est-ce qu'il permet de voir ce codage ?
859	Valentino W1	bah les modifications des diverses euh / enfin on compare avec euh
860	Professeur	avec le groupe externe et qu'est-ce qu'on en dégage?
861	Laurène B2	l'état du caractère
862	Professeur	l'état du caractère
863	Thomas B1	l'état dérivé ou
864	Professeur	états dérivés ou ancestraux / donc c'est un truc en plus c'est pas juste l'homologie primaire ensuite on code l'homologie primaire / si ici on utilise des méthodes probabilistes là je vous aide un peu dans la mesure où c'est dérivé des méthodes cladistiques cela suppose qu'on ait impliqué quelque part la polarisation de caractères d'accord en plus d'utiliser tout bêtement l'homologie / donc l'idée de polarisation finalement même si elle ne vous est pas dite / mais dans les méthodes modernes elle est implicite // OK / euh voilà / je crois qu'on est arrivé à la fin du tab de ce tableau là / alors maintenant qu'on a vu tout ça / pour arriver à poursuivre un peu / on va vous redistribuer la suite de ce tableau que vous est rempli / on va rajouter en fait trois lignes sur ce tableau / on a discuté d'un certain de choses on voudrait que vous approfondissiez / pour les classifications de Whittaker Cavalier-Smith et Burki / les trois classifications qui avaient quelque part une prétention évolutive / on va vous demander d'essayer d'approfondir certains points au vu de

		tout ce qu'on a raconté / essayer de voir si vous ne pouvez pas préciser certaines choses / juste avant de se lancer là-dedans / on a vu quatre systèmes de classification ici / est-ce qu'à votre avis ces quatre systèmes de classification sont / sont équivalents les uns par rapport aux autres ? / est-ce que vous pouvez faire des ensembles à l'intérieur de ces quatre classifications ? / est il y en a qui vont plutôt dans une même famille de classification et d'autres dans une autre famille de classification ? / par rapport aux quatre qu'on a vu / est-ce qu'elles répondent toutes au même problème [
865	Thomas B1	non]
866	Professeur	est-ce que est-ce qu'elles ont toutes la même ambition ces quatre classif ?
867	? (étudiant non identifié du groupe 1)	non
868	Professeur	est-ce que vous pouvez établir une dichotomie entre ces quatre systèmes de classifications ?
869	Pierrik W2	oui
870	Professeur	alors ce serait quoi cette dichotomie ?
871	Thomas B1	moi je sais pas
872	Valérie W2 (ou Romina C2 ?)	dichotomie donc deux (en chuchotant à son groupe)
873	Laurène B2	il y a celles qui cherchent à établir des liens de parenté
874	Professeur	oui / et les autres ?
875	[Valentino W1	(parlant à son groupe) c'est qui les autres ?
876	Florent W1	bah Whittaker par exemple]
877	Romina C2	Gasparini
878	Professeur	et l'autre c'était quoi Gasparini ça répondait à quel problème ?
879	Thomas B1	des problèmes de définition / il veut définir
880	Romina C2	bah définition écologique
881	Professeur	définition écologique / donc ça répondait plus au problème qui n'est pas dans le registre des liens de parenté mais qui était plus
882	Valentino W1	c'était plus fonctionnel
883	Professeur	oui c'était plus fonctionnel quelque part
884	Valentino W1	la classification fonctionnelle
885	Thomas B1	mais après ça se voit aussi / enfin Gasparini c'est un article d'encyclopédie / badapap (onomatopée) pardon/ dans une encyclopédie on essaie de mettre une définition de la chose alors que les autres c'est des articles scientifiques
886	Professeur	ça reste de l'article scientifique mais est-ce que la classification telle qu'elle était évoquée dans les articles répondait au même problème finalement ?
887	Valentino W1	non là c'est plus une classification fonctionnelle et les autres ce sont des classifications naturelles
888	Professeur	ouais / donc la première c'est plus une classification fonctionnelle / on avait dit qu'il y avait un problème qui était de quel ordre derrière ?
889	Valentino W1	écologique
890	Professeur	écologique / donc problème écologique une classif fonctionnelle / je regroupe les végétaux sans me préoccuper d'autre chose que du fait qu'ils soient photosynthétiques ce qui m'intéresse écologiquement / et les trois classifications ? / ce serait plutôt dans quel registre en tout cas quelle est l'ambition de ces classifications ?
891	Héloïse C3	établir des liens de parenté
892	Professeur	établir des liens de parenté / donc phylogénétique au sens au sens large après faut voir comment il est appliqué mais c'est un petit peu l'ambition de ces classifications / donc déjà on voit que toutes les classifications elles n'ont pas le même objectif / nous ce que l'on va essayer d'approfondir maintenant c'est les classifications à vocation disons évolutive phylogénétique au sens large / donc pour ces trois classif / là (Professeur montre le nouveau poly à remplir) / vous avez en fait un prolongement du tableau qui ne prolonge que les trois colonnes des classifications évolutives / ou on vous repose à nouveau quatre petites questions / donc la première on vous demande de faire un bilan sur la méthodologie qui a été utilisée en vous guidant un peu on vous redemande les caractères qui ont été vraiment utilisés finement cette

		fois-ci pour classer et si vous avez vu de manière apparente une méthode de reconstruction que vous pouvez nommer / d'accord en étant le plus précis possible / essayer d'aller un peu plus loin que le premier tableau / ensuite on vous demande pour que chacune de ces classifications ait été possible quelles ont été les conditions de possibilités techniques / est-ce qu'il y a des choses qui techniquement ont été nécessaires aux auteurs pour établir leur classification ? / d'accord est-ce qu'il y a des choses techniques vous pouvez aussi vous aider de la frise chronologique de voir ce qui a été vraiment nécessaire pour qu'ils en arrivent là techniquement / et puis ceux qui a été aussi nécessaire n'ont pas techniquement mais comme grands concepts scientifiques pour construire leur classification / est-ce qu'il y a des idées qui ont été nécessaires pour qu'ils puissent en arriver là / donc des concepts des concepts d'ordre cette fois-ci théorique hein / donc on est dans la théorie dans ce qui théoriquement a été vraiment nécessaire conceptuellement pour construire leur classif / et puis aussi autre question est-ce que derrière ces différents systèmes de classification il y a une idéologie ou des valeurs qui sont sous-jacentes qui seraient donc pas du registre scientifique / est il y a d'autres choses qui sont mobilisées dans ces classif là / des valeurs personnelles ou des idéologies quelles qu'elles soient / d'accord / donc on vous laisse combien de temps
893	Chercheur	une demi-heure
894	Professeur	une petite demi-heure pour remplir ce tableau là
895	Chercheur	25 minutes une demi heure 25 minutes

6.2. Transcription du débat collectif– partie 2 (synthèse sur les trois classifications à visée phylogénétique)

896	Professeur	Allez on y va / donc on va passer en revue les trois classifs pareil et essayer de faire de remplir les différentes catégories / alors par rapport à Whittaker / en faisant le bilan sur la méthodologie je repars / je recommence par vous à nouveau (en s'adressant au groupe 2)/ est-ce que vous pouvez-nous raconter des choses sur la méthodologie de Whittaker ? / finalement ce que vous en retirez
897	Valérie W2	pour nous les caractères utilisés c'était physiologique / la nutrition
898	Professeur	d'accord
899	Valérie W2	et la structure cellulaire
900	Professeur	d'accord / physiologique structure cellulaire OK
901	Valérie W2	la méthode on a mis que c'était non phylogénétique parce que non basée sur des caractères homologues
902	Professeur	d'accord
903	Valérie W2	malgré qu'il ait tenté de le faire
904	Professeur	d'accord / donc caractère utilisé donc ?
905	Valérie W2	physiologique et cellulaire
906	Professeur	physiologique et cellulaire //
907	Valérie W2	et méthode on a mis non phylogénétique car non basée sur les caractères homologues malgré les tentatives de le faire
908	Professeur	d'accord l'intention est là / mais la réalisation ne l'est pas / ne suit pas / OK // quelque chose rajouter quelqu'un qui ne serait pas d'accord / qui serait / ça va ? / par rapport aux conditions de possibilités techniques / qu'est ce qui techniquement a été nécessaire / à Whittaker pour établir sa classification ?
909	Valérie W2	microscopie
910	Thomas B1	microscope
911	Professeur	microscope / lequel ?
912	Valérie W2	électronique
913	Thomas B1	les deux
914	Professeur	alors est-ce qu'à votre avis optique et électronique ont été nécessaires ?

915	Valentino W1	l'optique plus que l'électronique
916	Professeur	ouais pourquoi en fait?
917	Thomas B1	bah les crêtes mitochondriales
918	Aude C1	et c'est Whittaker qui a
919	Professeur	donc plutôt microscopie photonique / a priori ou est-ce que l'électronique est nécessaire selon vous ? qu'est ce qui serait nécessaire d'utiliser enfin qu'est-ce qu'il a observé qui nécessiterait la microscopie électronique selon vous / est-ce que pour voir s'il y a un noyau ou pas noyau on a besoin d'un microscope électronique
920	Valentino W1	non
921	Professeur	donc a priori c'est le seul truc qu'il distingue majoritairement donc plutôt microscopie optique // est-ce que vous avez d'autres conditions de possibilités techniques / est-ce qu'il y a des caractères qui requièrent techniquement des choses particulières ?
922	Valentino W1	après c'était pour distinguer ceux qui font la photosynthèse ou de la
923	Professeur	ouais // est-ce que ça c'est technique vraiment ? Ou est-ce que il s'appuie / est-ce que techniquement il a besoin de mesurer ou est il le sait parce que ce sont des choses qui ont été établies
924	Valentino W1	il le sait
925	Professeur	a priori peut être qu'il le sait donc c'est dans la théorie de l'époque / justement théoriquement photosynthèse métabolisme ce serait a priori nécessaire pour faire cette dichotomie entre ce qui est photosynthétique et ce qui ne l'est pas / cela suppose que les connaissances soient là / est-ce que vous voyez autre chose ?
926	Valentino W1	il y a l'évolution
927	Professeur	l'évolution donc théoriquement vous voyez quelles théories associées à ça
928	Valentino W1	darwinisme
929	Professeur	oui darwinisme / s'il mobilise l'évolution a priori on peut imaginer que le darwinisme est mobilisé / d'accord / est-ce que vous voyez autre chose ? // n'hésitez pas / est-ce que vous voyez autre chose ?
930	Valentino W1	le début de la cladistique
931	Professeur	pardon ?
932	Valentino W1	le début de la cladistique
933	Professeur	alors début de la cladistique
934	Valentino W1	début très début
935	Professeur	c'est quoi la cladistique ? je vous repose la question que je vous avais posée tout à l'heure / quelle est l'originalité de la méthode cladistique par rapport aux autres méthodes ?
936	Manuella B3	euh la polarisation
937	Professeur	la polarisation / alors là est-ce qu'il y a polarisation ou est-ce qu'il y a pas ? non ou oui ?
938	Héloïse C3	(chuchotant) non
939	Aude C1	(chuchotant) bah absence de noyau présence de noyau
940	Valentino W1	(répondant à Aude C1) est-ce que ça s'est polariser ?
941	Professeur	parce que vous me dites si je comprends bien qu'il avait / si je reprends le début de votre classif vous me dites non phylogénétique car non basée sur des caractères homologues
942	Valentino W1	c'est son ambition donc il
943	Professeur	donc l'ambition / et si je replace la méthode cladistique qu'est-ce que je fais en premier ? la méthode cladistique
944	Valentino W1	je choisis des caractères homologues
945	Professeur	des caractères supposés homologues / je suppose une théorie de l'homologie primaire / est-ce que déjà je passe ce cap ?

946	Valentino W1	non
947	Marina W3	(chuchotant) non
948	Professeur	non / alors je repose ma question la cladistique est-ce que je la mets dans les conditions de possibilité théoriques ou pas ?
949	Héloïse C3	non [
950	Marina W3	non]
951	Valentino W1	c'est tout ce qu'il utilise ou c'est tout ce qui est à sa disposition ?
952	Professeur	c'est tout ce qu'il utilise réellement / tout ce qui est nécessaire vraiment[
953	Helena B1	aahh (prise de conscience qu'elle avait mal compris)]
954	Professeur	tout ce qu'il nécessite pour faire sa classification / c'est pas tout ce qui existe c'est pas parce qu'un existe qu'on utilise forcément
955	Evelyne C2	parce que nous on a pensé que c'était toutes les possibilités théoriques qu'il avait entre les mains
956	Professeur	ouais mais entre toutes les possibilités il y en a qui l'a vraiment / qui ont vraiment été nécessaires pour faire son truc et d'autres manifestement non puisque / là il mobilise pas des choses / non je sais pas /
957	Valentino W1	oui si c'est ce qu'il a utilisé
958	Professeur	donc au regard de ça si on se met d'accord alors plus sur ce qu'est condition de possibilité on va peut-être plus clarifier ça / c'est ce qui a vraiment été nécessaire et donc mobilisé par l'auteur pour construire sa classif / d'accord / dès lors a priori cladistique euh je / je vais pas le mettre / ça ne pas dire que ça n'existait pas à l'époque / il y a plein de choses qui existent aujourd'hui que vous n'utilisez pas // alors est-ce qu'il y a est-ce que vous voyez autre chose conditions de possibilité théoriques est-ce que vous avez repéré des choses ou pas ?
959	Valentino W1	bah euh bah le gradisme
960	Professeur	alors ça c'est idéologie d'accord donc idéologie / gradisme est-ce que vous avez vu précisément des choses qui chez Whittaker suggéraient qu'il était gradiste ?
961	Thomas B1	three higher kingdoms
962	Valentino W1	le terme de règne supérieur
963	Thomas B1	règnes supérieurs
964	Professeur	ouais supériorité infériorité
965	Aude C1	les procaryotes tout en bas
966	Valentino W1	les flèches qui partent des procaryotes et qui vont tout en bas et qui montent
967	Professeur	donc les flèches / qui tendraient à faire quoi ces flèches
968	Aude C1	montrer l'évolution / montrer l'évolution des organismes
969	Professeur	montrer l'évolution et à lui donner un sens hein / finalement / d'accord / est-ce que vous avez-vu d'autres choses qui suggéraient chez Whittaker que des éléments gradistes (silence) / bon pour vous est-ce que ça c'est du ressort de la science et pourquoi ?
970	Thomas B1	ça a été du ressort de la science
971	Professeur	bon je ne vais pas vous demander ce qu'est la science / ce serait pas le /
972	Réaction générale	oh la non
973	Romina C2	c'est un peu tard
974	Professeur	c'est un peu tard
975	Thomas B1	on a eu le débat avec /
976	Professeur	très bien / donc là (montrant la case du tableau) hop d'accord gradisme/ vous voyez d'autres idéologies sous-jacentes ?
977	Florent W1	écologie
978	Valentino W1	écologie / du fait des caractères qu'il a sélectionné

979	Thomas B1	ouais c'est ça
980	Professeur	alors est-ce que ça c'est de l'idéologie ?
981	Valentino W1	des valeurs
982	Aude C1 (ou Helena B1)	c'est des valeurs
983	Valentino W1	valeurs c'est plus
984	Thomas B1	c'est subjectif
985	Professeur	d'accord
986	Florent W1	moi je vois idéologies et valeurs c'est plus
987	Professeur	donc plus l'idée qu'il y a une subjectivité dans son choix
988	Aude C1 (ou Helena B1)	jugement de valeurs [
989	Professeur	qui est liée à son statut d'écologue[
990	Thomas B1	oui d'est ça]
991	Professeur	mais c'est pas le fait d'avoir utilisé des données écologiques qui est une valeur en soi / c'est juste le fait que lui était influencé peut être par / par quelque chose d'autre / d'accord avec ça ou pas ?
992	Pierrik W2	(chuchotant) oui
993	Professeur	dites moi si vous avez d'autres chose à rajouter / malgré la fatigue
994	Chercheur	ce qui est en noir/ je le laisse en noir c'est un consensus ? tout le monde d'accord là-dessus ? c'est scientifique le gradisme ?
995	Professeur	donc à l'époque c'était scientifique ?
996	Florent W1	oui à l'époque c'était scientifique
997	Pierrik W2	à l'époque oui
998	Professeur	il y a des choses qui sont scientifiques à une époque qu'ils ne sont pas d'autres ?
999	Pierrik W2	(chuchotant) oui
1000	Florent W1 / Valentino W1	ouais
1001	Thomas B1	(chuchotant) bah ouais je pense
1002	Professeur	OK alors par rapport à la deuxième classif / Cavalier-Smith pareil / méthodologiquement / quels caractères il utilise ?
1003	Plusieurs étudiants	cellulaires
1004	Professeur	cellulaires
1005	Helena B1	(chuchotant) moléculaires
1006	Evelyne C2	moléculaires
1007	Valérie W2	des pigments donc moléculaires
1008	Professeur	certains caractères moléculaires comme les pigments / d'accord
1009	Valentino W1	les crêtes mitochondriales
1010	Professeur	ouais ça reste le registre cellulaire / et alors lui par rapport à sa méthode quel regard vous portez dessus ?
1011	Valentino W1	ah c'est phylogénétique
1012	Valérie W2	on a mis phylogénie cladistique
1013	Professeur	phylogénie cladistique est-ce que vous êtes tous d'accord avec ça ? / est-ce que c'est phylogénétique est-ce que c'est cladistique ? [
1014	Helena B1	(chuchotant) moi j'ai mis phénétique cladistique]
1015	Professeur	comment est-ce que vous positionnez par rapport à ça ? tu dis cladistique pourquoi ce serait cladistique
1016	Evelyne C2	parce qu'il cherche justement à faire des liens de parenté et se servir de caractères homologues

1017	Professeur	alors il cherche à le faire est-ce qu'il le fait ? /
1018	Thomas B1	(chuchotant) si je pense
1019	Evelyne C2	oui / enfin ?
1020	Professeur	est-ce que vous une méthodologie qui
1021	Valentino W1	cladistique il y a un groupe externe dans son
1022	Professeur	alors est-ce qu'il mentionne des groupes externes dans la construction de son de ses groupes ?
1023	Valentino W1	c'était juste une question
1024	Héloïse C3	(chuchotant) j'crois pas
1025	Aude C1	non
1026	Professeur	est-ce qu'il mentionne / déjà en prenant le départ je repose la question cladistique ça part de quoi ? /
1027	Laurène B2	hypothèse d'homologie primaire
1028	Professeur	hypothèse d'homologie primaire alors ça est-ce qu'il passe ce cap ou pas ? est-ce que clairement il émet des hypothèses d'homologie primaire qu'il y a des arguments qui lui permettraient d'émettre des hypothèses ou pas dans votre
1029	Thomas B1	il a la volonté de faire des groupes monophylétiques
1030	Professeur	volonté
1031	Valentino W1	c'est pareil que Whittaker
1032	Professeur	mais est-ce qu'il le fait ?
1033	Thomas B1	non a priori non
1034	Valentino W1	a priori non c'est ce qu'on avait tout à l'heure
1035	Romina C2	lui il part du principe que si c'est cellulaire euh on a l'impression que c'est homologue
1036	Professeur	d'accord
1037	Romina C2	pour lui si c'est cellulaire c'est homologue
1038	Aude C1	(chuchotant) il ne le dit pas / il dit pas tout ça
1039	Professeur	d'accord ouais / si c'est cellulaire a priori c'est homologue donc peut-être que son hypothèse d'homologie à lui elle est là / pourquoi pas / cladistique ensuite qu'est-ce qu'on fait en cladistique ?
1040	Aude C1	on polarise
1041	Professeur	on polarise est-ce qu'il y a mention de polarisation quelque part dans son travail ?
1042	Aude C1	non
1043	Valentino W1	non je ne crois pas
1044	Professeur	donc est-ce que je peux dire que c'est cladistique ?
1045	Romina C2	non
1046	Valentino W1	non
1047	Professeur	a priori non /est-ce que c'est phylogénétique [
1048	Valentino W1	(chuchotant) phénétique]
1049	Professeur	si c'est pas polarisé ou pas ? (silence) faudrait peut-être s'entendre qu'est-ce qu'on entend par phylogénétique / ce serait quoi dans l'idée ?
1050	Héloïse C3	des liens de parenté
1051	Professeur	des liens de parenté / juste ça ? établir des liens de parenté
1052	Thomas B1	(chuchotant)
1053	Professeur	quel type de groupe on va figurer dans ce / dans une classification phylogénétique normalement ?
1054	Valentino W1	mono
1055	Héloïse C3	monophylétique
1056	Professeur	monophylétique est-ce que / est-ce qu'il est sûr que tous les groupes qu'il a mobilisés sont monophylétiques
1057	Aude C1	non non il est pas sûr

1058	Valentino W1	non
1059	Professeur	en tout cas qu'est-ce que vous me suggérez de mettre dans cette case là [en montrant la grille à remplir vidéoprojetée]
1060	Valérie W2	volonté de
1061	Valentino W1	volonté
1062	Professeur	ouais volonté / la volonté est là
1063	Laurène B2	(chuchotant)
1064	Professeur	d'accord // alors pareil conditions de possibilités techniques qu'est-ce que vous voyez qu'est-ce qui a été nécessaire pour / est-ce que lui techniquement il y a des choses qui
1065	Evelyne C2	microscope électronique
1066	Professeur	microscopie électronique alors pour quel type de caractères ?
1067	Valentino W1	les crêtes mitochondriales
1068	Professeur	morphologie des crêtes mitochondriales les critères qui ont été cités sont assez pointus quelque part donc ça microscopie électronique oui / clairement
1069	Valentino W1	il y a le séquençage mais est-ce que lui il l'utilise ?
1070	Professeur	alors séquençage / est-ce que lui il l'utilise vraiment ?
1071	Plusieurs étudiants	non
1072	Thomas B1	et pour le cytochrome C là qu'est qu'il a fait du coup ?
1073	Professeur	alors est-ce qu'il a utilisé lui le cytochrome C ?
1074	Héloïse C3	non non c'est un argument pour son / sa / il s'appuie / ça correspond à son / c'est pas lui non non
1075	Valentino W1	c'est pas lui
1076	Professeur	lui il ne l'a pas pratiqué / il a utilisé des données de séquençage qu'il reconnaît comme étant pertinente / alors à voir c'est pas lui qu'il l' a utilisé / peut-être que c'est une condition technique nécessaire à son cheminement de pensée mais en tout cas il ne l'a pas mobilisé lui-même par // théoriquement qu'est-ce qu'il a / qu'est-ce qu'il lui a été nécessaire ?/ est-ce que vous voyez des choses qui / étaient nécessaires à son cheminement de pensée
1077	Romina C2	normalement il y a Hennig qui est passé par là
1078	Professeur	il y a Hennig mais est-ce qu'il a mobilisé vraiment la théorie hennigienne ?
1079	Valentino W1	pas vraiment
1080	Romina C2	apparemment non
1081	Professeur	la méthodologie hennigienne
1082	Valentino W1	bah non [puisqu'on a dit qu'il ne faisait pas de phylogénie
1083	Thomas B1	on vient de dire plus haut qui n'a pas vraiment réussi]
1084	Professeur	est-ce que vous le mettez dans les possibles théoriques ou pas ? dans ce qui aurait été vraiment nécessaire à la construction / est-ce que cela a été un truc sans lequel il n'aurait pas pu construire sa classif' ?
1085	Romina C2	apparemment non
1086	Professeur	apparemment moi je ne le dis pas je dis rien
1087	Romina C2	bah pour tout le monde / mais euh il s'est basé sur quoi alors ?
1088	Valérie W2	il s'est quand même inspiré
1089	Professeur	alors il s'est inspiré de quoi / qu'est-ce qu'il est utilisé si on essaie de voir ?
1090	Valérie W2	l'hypothèse d'homologie primaire
1091	Professeur	oui il a pu faire potentiellement des hypothèses d'homologie / l'homologie est-ce que c'est hennigien l'homologie ?
1092	Romina C2	non c'est Saint-Hilaire
1093	Valentino W1	Saint-Hilaire
1094	Professeur	Saint-Hilaire ça remonte à quand Saint-Hilaire ?
1095	Valentino W1	1700

1096	Thomas B1	je sais plus
1097	Romina C2	XVIIe siècle
1098	Professeur	en termes de siècle ?
1099	Valentino W1	18e ?
1100	Valérie W2	(parlant peu fort) 1818 / je pense
1101	Romina C2	18-18 facile
1102	Professeur	ouais donc ? [s'il mobilise l'homologie peut-être / qu'est-ce que vous mettez comme [montrant la case condition de possibilité théorique]
1103	Valentino W1	(chuchotant) 18e non ?]
1104	Chercheur	ça date du ? j'ai pas entendu
1105	Valérie W2	19e siècle
1106	Professeur	ouais alors / est-ce que c'est nécessaire ? / l'homologie est-elle nécessaire comme ? / l'homologie est-il un concept nécessaire à ce que Cavalier-Smith a fait ?
1107	Pierrik W2	bah oui
1108	Laurène B2	ça sert à quoi si [propos suivant pas audibles]
1109	Professeur	au regard de tes connaissances actuelles / mais c'est une condition nécessaire pas suffisante mais nécessaire
1110	Laurène B2	OK
1111	Professeur	en tout cas lui ça lui a semblé nécessaire et manifestement suffisant
1112	Laurène B2	oui mais j'ai un truc que je ne comprends pas s'il a une méthode pourquoi il ne la suit pas / qu'est-ce qu'il fait ?
1113	Professeur	qu'est-ce qu'il / ou est-ce qu'il te donne sa méthode lui ? / c'est quoi sa méthode qu'il a utilisé ?
1114	Professeur	c'est juste basé sur des homologies toi tu as un regard par rapport à ce que tu sais de l'actuel
1115	Laurène B2	mais concrètement qu'est-ce qu'il a fait ?
1116	Plusieurs étudiants	rire
1117	Professeur	c'est pas moi qui ai construit la classification
1118	Romina C2	[en riant] mais qu'est-ce que vous avez fait !
1119	Professeur	concrètement qu'est-ce qu'il a fait / je vous renvoie la question / qu'est-ce qu'il a fait concrètement ?
1120	Thomas B1	il a regardé des ressemblances mais il n'a pas pu dire / il n'a pas pu valider les hypothèses d'homologie
1121	Valentino W1	il a essayé de l'appliquer à autre chose que
1122	Laurène B2	mais comment est-ce que tu fabriques un arbre ?
1123	Valérie W2	il n'avait pas les moyens
1124	Professeur	comment il a fabriqué un arbre ? / déjà l'arbre est-ce qu'il a un aspect d'arbre phylogénétique tel que vous le connaissez actuellement ? [Plusieurs discussions de groupe en parallèle]
1125	Valentino W1	comment il a représenté ça Cavalier ?
1126	Professeur	alors à votre avis comment il a fait cette représentation ? / comment il est arrivé à cette représentation ?
1127	Thomas B1	elle est où elle est où la représentation de Cavalier ?
1128	Héloïse C3	elle est là la [en montrant la figure sur l'article] [en même temps discussion dans le groupe 2]
1129	Pierrik W2	euh non pas terrible / pas chez lui
1130	Romina C2 (ou Valérie W2)	c'est bizarre à quoi il ressemble ?
1131	Pierrik W2	il ressemble à rien / c'est des cases avec des flèches
1132	Professeur	il a quoi comme type de représentation c'est ce genre de truc-là [en montrant la figure sur l'article à tout le groupe] / ce genre de truc-là à votre avis comment il l'a

		fait ?
1133	Thomas B1	il a groupé en groupes enfin il a regroupé
1134	Professeur	ouais / il a regroupé selon selon ?
1135	Thomas B1	selon des caractéristiques / cellulaires
1136	Professeur	et très concrètement comment il a fait il a ?
1137	Thomas B1	ça ressemble ça ressemble pas c'est la même chose c'est pas la même chose
1138	Professeur	ouais
1139	Aude C1	[chuchotant] les acquisitions quand même
1140	Professeur	il a fait ça un peu en tâtonnant [
1141	Valentino W1	il a fait ça au feeling
1142	Thomas B1	avec ce qu'il avait quoi]
1143	Professeur	sur la base de ce qu'il avait quoi [
1144	Thomas B1	sur la base de ce qu'il avait on ne peut pas lui en vouloir]
1145	Professeur	ou de ce qu'il pensait nécessaire / donc il est clair qu'on n'est pas dans une optique de lui en vouloir ou pas [rire] / mais d'accord // alors est-ce qu'il a utilisé d'autres principes / dans sa reconstruction est-ce que vous avez vu d'autres principes qui étaient évoqués qu'il aurait pu utiliser / partiellement [
1146	Valentino W1	quels principes ? il y aurait quels principes ?]
1147	Professeur	de la manière dont vous l'imaginez ou pas
1148	Valentino W1	est-ce que l'endosymbiose ?
1149	Aude C1	euh
1150	Professeur	alors il mobilise l'endosymbiose // ça ça pourrait être considéré comme un possible théorique / c'est vrai qu'il utilise il mobilise cette théorie là /
1151	Evelyne C2	le nombre de membranes
1152	Professeur	le nombre de membranes il parle explicitement dans d'endosymbiose oui / autre chose ? / non vous n'avez rien vu d'autre méthodologiquement ? alors est-ce qu'il y a de l'idéologie et des valeurs là-dessous / sous-jacentes ou pas ?
1153	Aude C1	il y encore un peu de gradisme
1154	Professeur	qui se manifeste sous quelle forme ? est-ce que vous avez vu des indices de gradisme dans ce travail ?
1155	Valentino W1	les flèches aussi non ?
1156	Professeur	les flèches alors c'est quoi ces flèches ?
1157	Valentino W1	il y a encore des flèches
1158	Aude C1	elles servent à illustrer
1159	Thomas B1	elles induisent un sens
1160	Valentino W1	elles illustrent
1161	Professeur	ouais qui induisent un sens évolutif
1162	Aude C1	bah déjà on va des procaryotes ensuite on monte aux eucaryotes et voilà il y a des flèches qui montent vers des ajouts
1163	Professeur	d'accord vers des choses qui seraient jugées donc [
1164	Aude C1	plus évoluées]
1165	Professeur	plus évoluées [plus complexes
1166	Valentino W1	linéaires]
1167	Professeur	vous avez vu d'autres éléments dans son texte des figures ou autre qui laissent entendre qu'il soit gradiste ?
1168	Aude C1	euh / non enfin moi j'en ai pas vu
1169	Professeur	c'est bon / alors je sens du mou au fond c'est vous qui allez me présenter la dernière colonne du tableau
1170	Thomas B1	après / après au niveau des valeurs / enfin je sais pas si des valeurs sous-jacentes mais j'ai le sentiment après si je dis une bêtise c'est pareil vous m'arrêtez mais qu'il y a une volonté pas de révolutionner mais / il veut aller plus loin que les observations cellulaires il parle vraiment de

1171	Valentino W1	il critique tout ce qu'il y a avant
1172	Thomas B1	il critique vraiment les autres / classifications
1173	Valentino W1	très très fort
1174	Thomas B1	genre les deux règnes les quatre règnes il les dézingue / du coup enfin pareil a une volonté d'être révolutionnaire en incluant les données moléculaires / enfin il aimerait que ce soit utilisé en plus plus tard dans le futur
1175	Professeur	est-ce que tu veux dire par là qu'il a des volontés un petit peu personnelles des ambitions personnelles ou est-ce que tu veux juste dire que [
1176	Helena B1	ah oui
1177	Valentino W1	ouais peut-être
1178	Aude C1	si il a envie de s'illustrer]
1179	Professeur	qu'est-ce que tu sous-entends par là / est-ce que c'est quelque chose qui serait casser pour casser
1180	Thomas B1	non pas casser pour casser il veut changer / il veut modifier
1181	Valentino W1	il veut être le Darwin
1182	Thomas B1	en fait il voudrait qu'on se base sur l'idée qu'il a dit que c'est mieux d'utiliser les données moléculaires
1183	Professeur	donc un peu prosélyte quoi [
1184	Thomas B1	j'sais pas j'ai pas lu le texte mais]
1185	Professeur	vouloir promouvoir un certain type de caractères et dire que c'est les meilleurs
1186	Thomas B1	il a l'air de dire que c'est plus cohérent scientifiquement
1187	Aude C1	que c'est plus rigoureux [
1188	Thomas B1	c'est plus rigoureux quoi]
1189	Aude C1	d'utiliser les critères cellulaires que purement anatomiques et les modes de nutrition
1190	Thomas B1	et les modes de nutrition comme Whittaker
1191	Professeur	et comment vous le jugez ? vous le jugez comme une valeur personnelle / vous le jugez comme une idéologie vraiment ou
1192	Valentino W1	peut-être dans son enfance... [rire]
1193	Professeur	d'accord / pour la dernière catégorie pour Cavalier Smith
1194	Chercheur	pour Burki
1195	Professeur	à vous
1196	Benoît W1	pour Burki non ?
1197	Manuella B3	Burki
1198	Professeur	Burki pardon
1199	Manuella B3	les caractères ils sont moléculaires
1200	Professeur	donc caractères d moléculaires OK
1201	Manuella B3	bon il s'appuie aussi sur des donnés morpho-anatomiques parce que
1202	Professeur	ouais
1203	Manuella B3	enfin il fait un mélange avec voilà avec les autres classifications / il s'appuie vachement là-dessus / il est il est correct
1204	Thomas B1	ouais c'est une synthèse / ça se trouve il a tout piqué on sait pas
1205	Valentino W1	parce qu'a priori il a déjà piqué la figure
1206	Professeur	alors piqué
1207	Thomas B1	il s'en est inspiré
1208	Professeur	qu'est-ce que piquer en sciences aussi c'est pareil / il a fait une synthèse
1209	Manuella B3	ouais
1210	Professeur	alors méthodologiquement ?
1211	Manuella B3	c'est phylogénomique
1212	Professeur	phylogénomique d'accord / alors phylogénomique on l'a dit c'était aligner plein de gènes et tout ça / alors c'est / ça s'inscrit dans quelle grande méthode on en avait

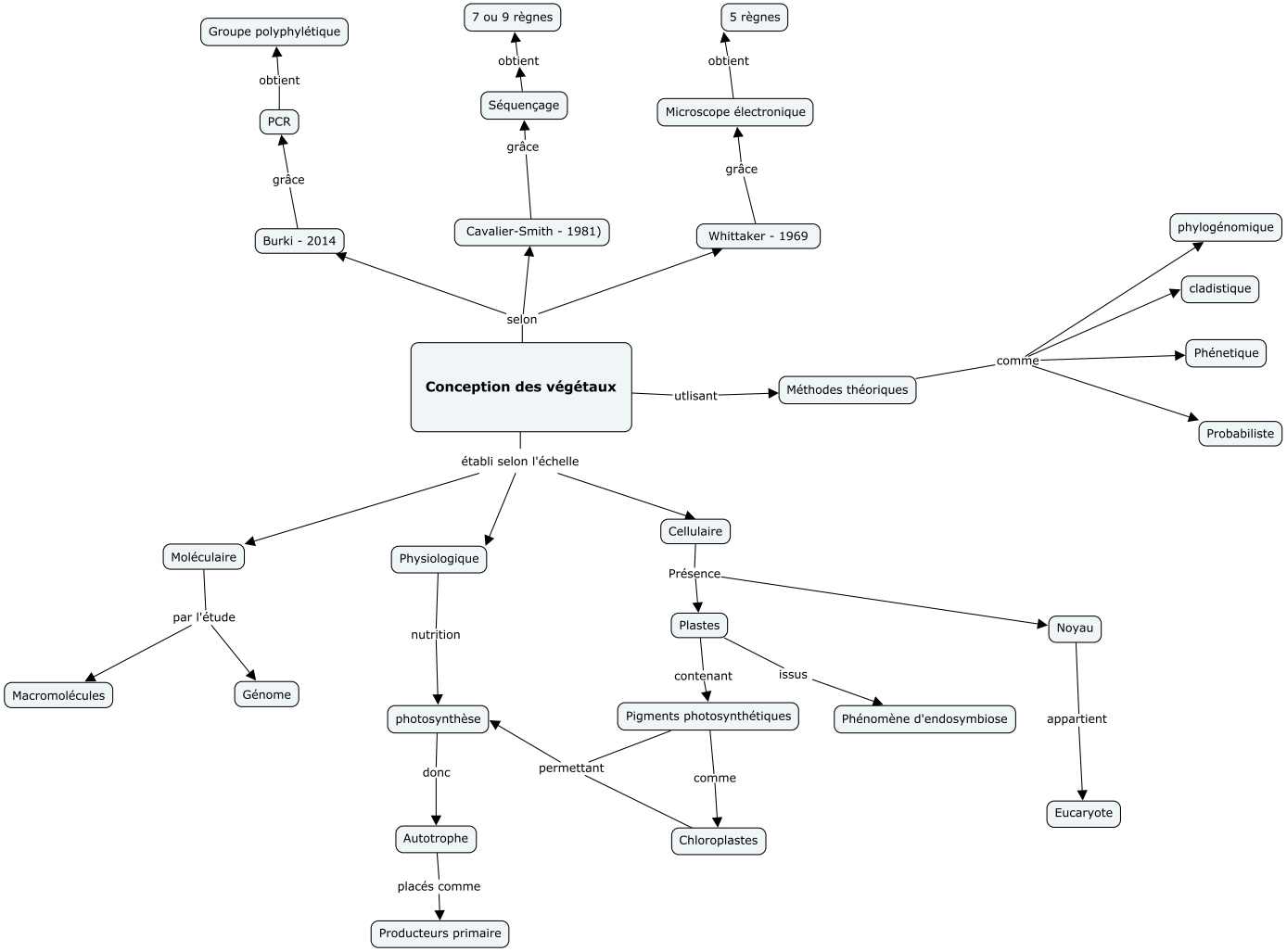
		parlé un peu
1213	Thomas B1	phylogénétique
1214	Professeur	phylogénétique alors là pour le coup on est dedans / c'est un type de méthode phylogénétique et même
1215	Manuella B3	probabiliste
1216	Professeur	on avait dit probabiliste / donc les méthodes qui sont le plus utilisé actuellement qui intègrent des modèles d'évolution // est-ce que vous avez d'autres choses à ajouter par rapport à ça ? // non
1217	Romina C2	mais donc il n'y en a aucun qui utilise la cladistique au final
1218	Professeur	alors par rapport à la cladistique / alors probabiliste c'est un dérivé de la cladistique finalement c'est quelque chose qui intègre des choses en plus qui sont des modèles d'évolution mais c'est un dérivé de ça
1219	Romina C2	d'accord
1220	Professeur	donc peut-être justement cladistique on peut le placer / où est-ce que vous le placeriez du coup ?
1221	Romina C2	bah dans les modèles théoriques
1222	Professeur	oui dans les possibilités théoriques là pour le coup pas de méthode probabiliste sans qu'il y ait eu de la cladistique antérieurement / donc dans les possibles théoriques cladistique oui // et dans les possibles techniques est-ce que vous voyez des choses qui sont nécessaires
1223	Valérie W2	séquençage
1224	Professeur	séquençage oui quoi d'autre ?
1225	Plusieurs étudiants	PCR
1226	Professeur	PCR nécessaire c'est sûr
1227	Manuella B3	microprocesseur
1228	Thomas B1	sûrement la bioinformatique pour tout aligner
1229	Professeur	la bioinformatique qui est nécessaire pour tout aligner même le traitement qui est fait après des données c'est sûr tout ça ça rentre dedans // d'accord / Est-ce que vous avez identifié d'autres possibles théoriques / d'autres choses qui théoriquement étaient nécessaires
1230	Valérie W2	ben nous on a mis probabiliste
1231	Romina C2	on a mis probabiliste
1232	Professeur	probabiliste c'est sûr / c'est la méthode elle-même finalement donc
1233	Pierrik W2	la phylogénomique elle date pas d'hier à ce moment là
1234	Professeur	alors phylogénomique est-ce qu'on le met en possible théorique ou technique ?
1235	Pierrik W2	les deux mon capitaine
1236	Professeur	c'est un peu les deux à la fois parce que derrière phylogénomique il y a quoi / c'est l'idée d'utiliser beaucoup de caractères donc quelque part cela suppose déjà une réflexion donc quelque part une théorie derrière mais c'est aussi technique puisque le fait d'aligner plein de données comme ça faut pouvoir le faire avec des outils informatiques et autres donc ça rentre un peu dans les deux finalement
1237	Manuella B3	on a remis la théorie de l'endosymbiose mais bon on l'avait déjà vu avant
1238	Professeur	ouais / ça a pu être remobilisé pourquoi pas / de la même manière qu'il faudrait dire que le darwinisme a été remobilisé aussi / quelque part c'est le cas / dès l'instant où il a de l'évolution un peu sérieuse sous-jacente / d'accord / et est-ce que vous avez vu autre chose que ça ? de l'idéologie / des choses particulières par rapport à ?
1239	Valentino W1	moins de gradisme
1240	Aude C1	ben il n'y en a plus
1241	Thomas B1	plus du tout
1242	Valentino W1	presque plus
1243	Professeur	est-ce qu'il y en a moins est-ce qu'il n'y en a presque plus est-ce qu'il n'y en a pas ?

1244	Pierrik W2	[chuchotant] non pas du tout
1245	Evelyne C2	[chuchotant] il y en a pas
1246	Pierrik W2	[chuchotant] tout arrive à l'actuel / à aujourd'hui
1247	Thomas B1	même la forme de sa figure
1248	Valentino W1	la forme de la figure
1249	Benoît W1	ben il n'y en pas
1250	Thomas B1	le cercle
1251	Professeur	ouais
1252	Thomas B1	ça induit aucun gradisme
1253	Professeur	en quoi le cercle ça induit aucun gradisme ?
1254	Valentino W1	chacun de la même distance du centre
1255	Professeur	d'accord / donc toutes les espèces sont positionnées pareilles [
1256	Héloïse C3	[chuchotant] au même rang]
1257	Professeur	par rapport au centre qui matérialise quoi ?
1258	Laurène B2	la racine [
1259	Aude C1	la racine
1260	Thomas B1	LUCA]
1261	Professeur	ça matérialise la racine ?
1262	Valentino W1	non LUCA
1263	Thomas B1	LUCA
1264	Laurène B2	l'ancêtre
1265	Professeur	l'ancêtre hypothétique de / le dernier ancêtre hypothétique commun de tous les ?
1266	Valentino W1	les organismes
1267	Professeur	c'est tous les organismes dans l'arbre ?
1268	Valentino W1	ah c'est eucaryotes
1269	Thomas B1 et Aude C1	eucaryotes
1270	Professeur	eucaryotes hein / c'est pas LUCA qui est représenté au centre / c'est le dernier ancêtre de tous les eucaryotes / dernier ancêtre hypothétique de tous les eucaryotes // OK est-ce que vous voyez d'autres indices
1271	Aude C1	moi je dirais qu'il utilise le terme de super groupe au lieu de règne
1272	Professeur	ouais
1273	Aude C1	et règne je trouve que ça a une connotation de dominance
1274	Professeur	d'accord / OK donc là il y a une volonté enfin / de quelque chose de plus neutre par rapport à ça / alors tu disais qu'il n'y en a presque plus [sous-entendu de gradisme] est-ce qu'il y en a quand même et est-ce que tu l'as vu quelque part / du coup ?
1275	Thomas B1	c'est quoi la question ?
1276	Professeur	est-ce qu'il y en a quand même du gradisme ? / est-ce que vous avez identifié des traces ?
1277	Valérie W2	non
1278	Thomas B1	non non parce qu'en fait son article est construit de façon à / il détaille tous les groupes et c'est tout
1279	Professeur	d'accord
1280	Thomas B1	après il détaille euh / non je ne pense pas qu'il donne vraiment de jugement de valeur par rapport à ça
1281	Valentino W1	non
1282	Professeur	donc alors par rapport à peut être que / tu vois quelque chose à [s'adressant à Chercheur en regardant la grille à remplir] // alors pour donner une sorte de mot de la fin bien que ce ne soit pas le but de la séance puisque vous savez que l'objectif est plutôt de compiler un certain nombre de choses et de les analyser a posteriori / mais d'ores et déjà au travers de ces trois classifs / finalement est-ce que vous voyez les raisons qui ont modifié la conception de végétal finalement / entre Whittaker

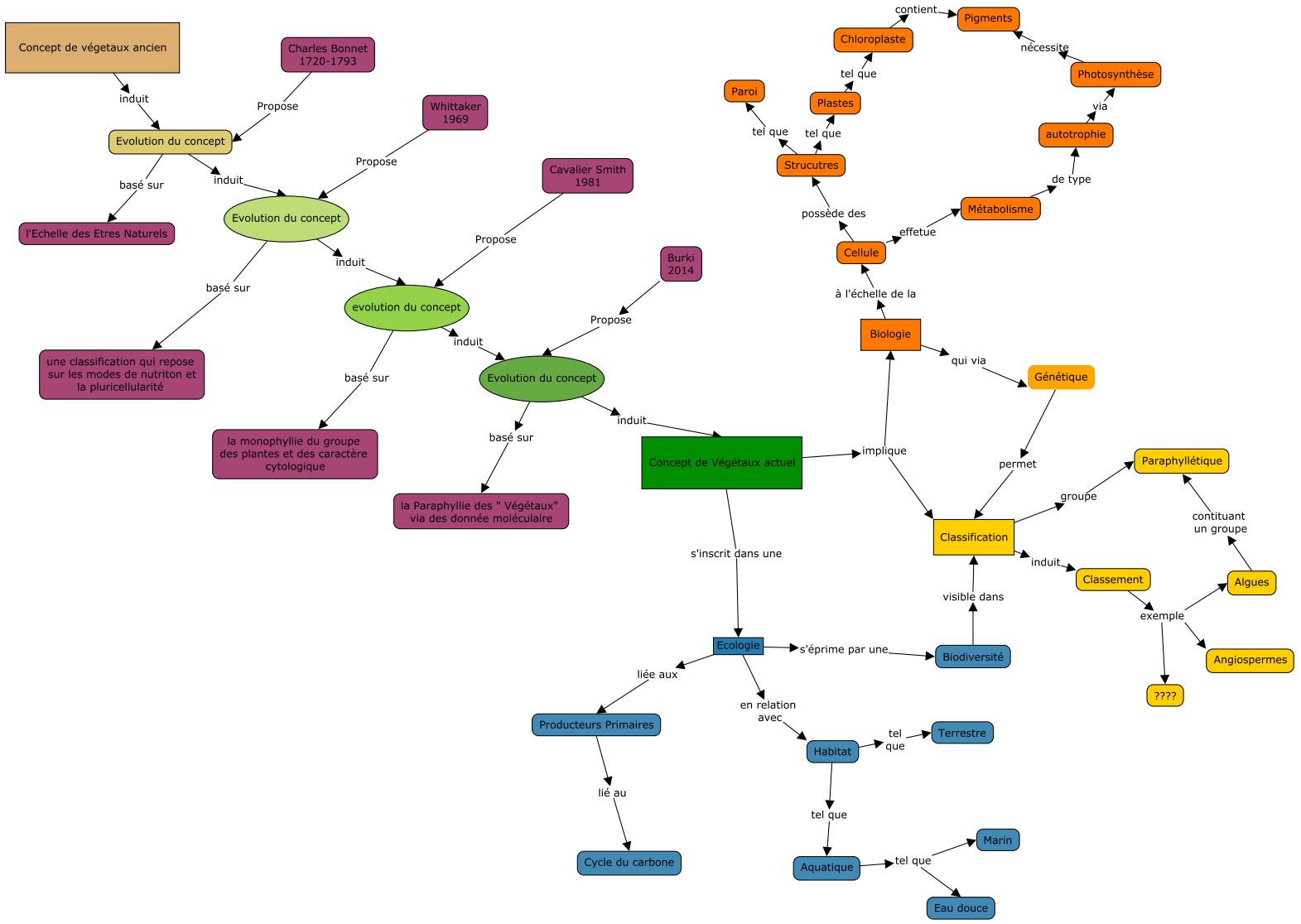
		Cavalier-Smith Burki qu'est-ce que vous voyez
1283	Benoît W1	c'est l'essor des nouvelles / technologies
1284	Professeur	donc l'essor des nouvelles technologies
1285	Valentino W1	techniques et / enfin techniques et théories
1286	Professeur	techniques et théoriques aussi / l'essor de nouvelles théories qui ont modifié un peu le contour / vous voyez autre chose encore ? // qu'est-ce qui a finalement été mêlé à ces classifications ?
1287	Valentino W1	la place de l'homme / enfin le gradisme
1288	Aude C1	oui
1289	Professeur	le gradisme c'est-à-dire des idéologies qui par essence ne sont pas scientifiques / donc ça été peut-être un frein à concevoir les choses d'une certaine manière / donc la conception de végétal on voit clairement le changement de son contour au gré de ces différentes choses là / donc sans jugement de notre part / mais c'est fait / donc bah à suivre

7. Les cartes conceptuelles

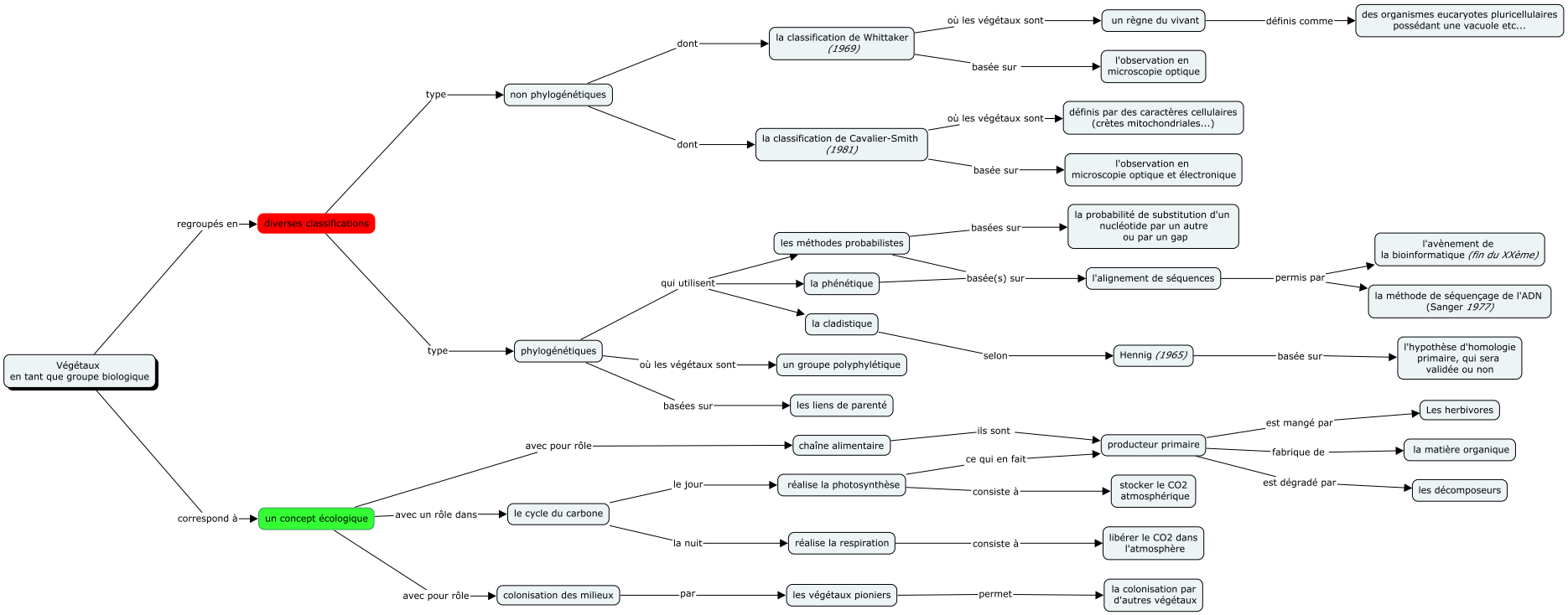
7.1. Carte du groupe A2 (Karima et Aude)



7.2. Carte du groupe A3 (Jonathan et Pierrik)

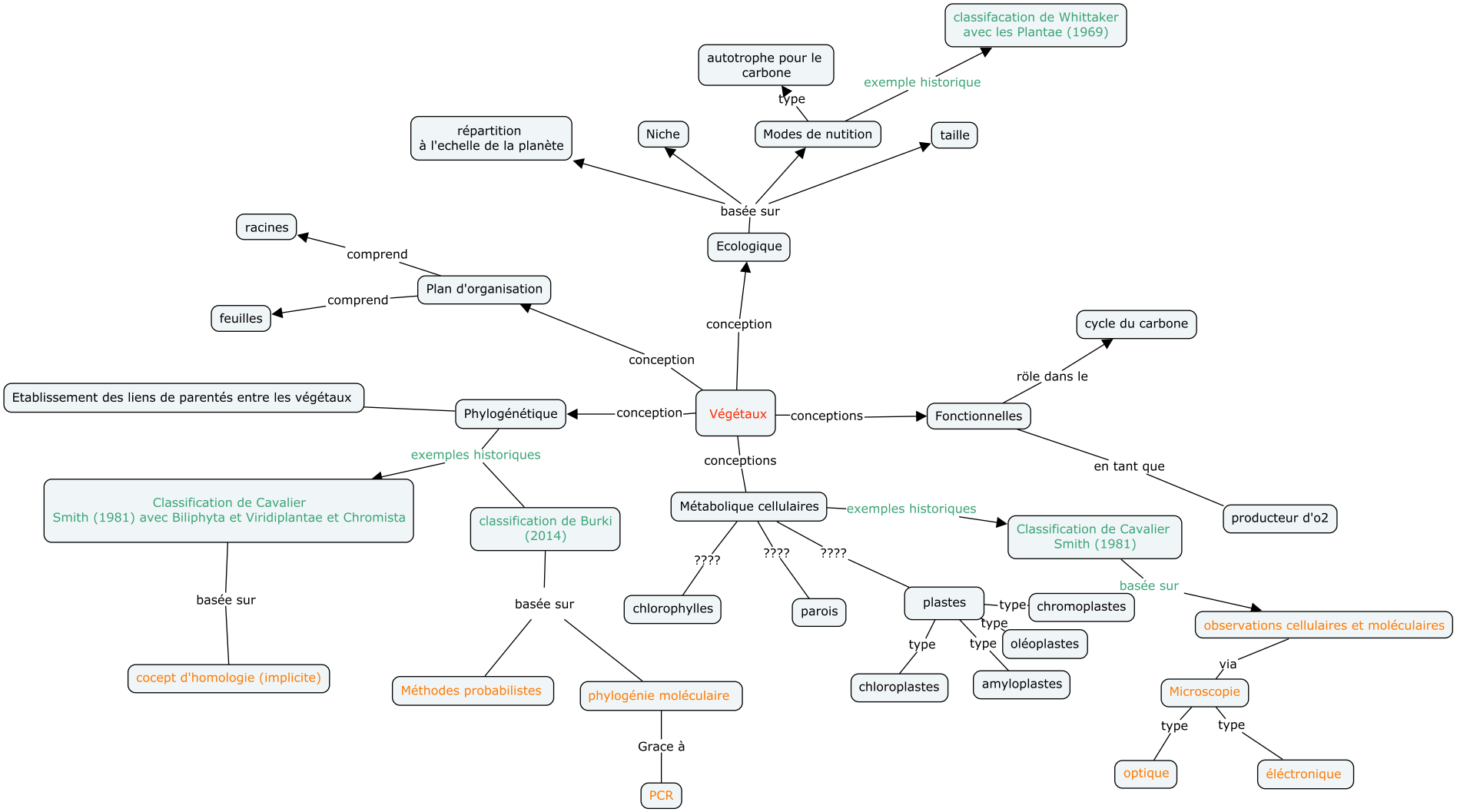


7.3. Carte du groupe A4 (Laurène et Thomas)

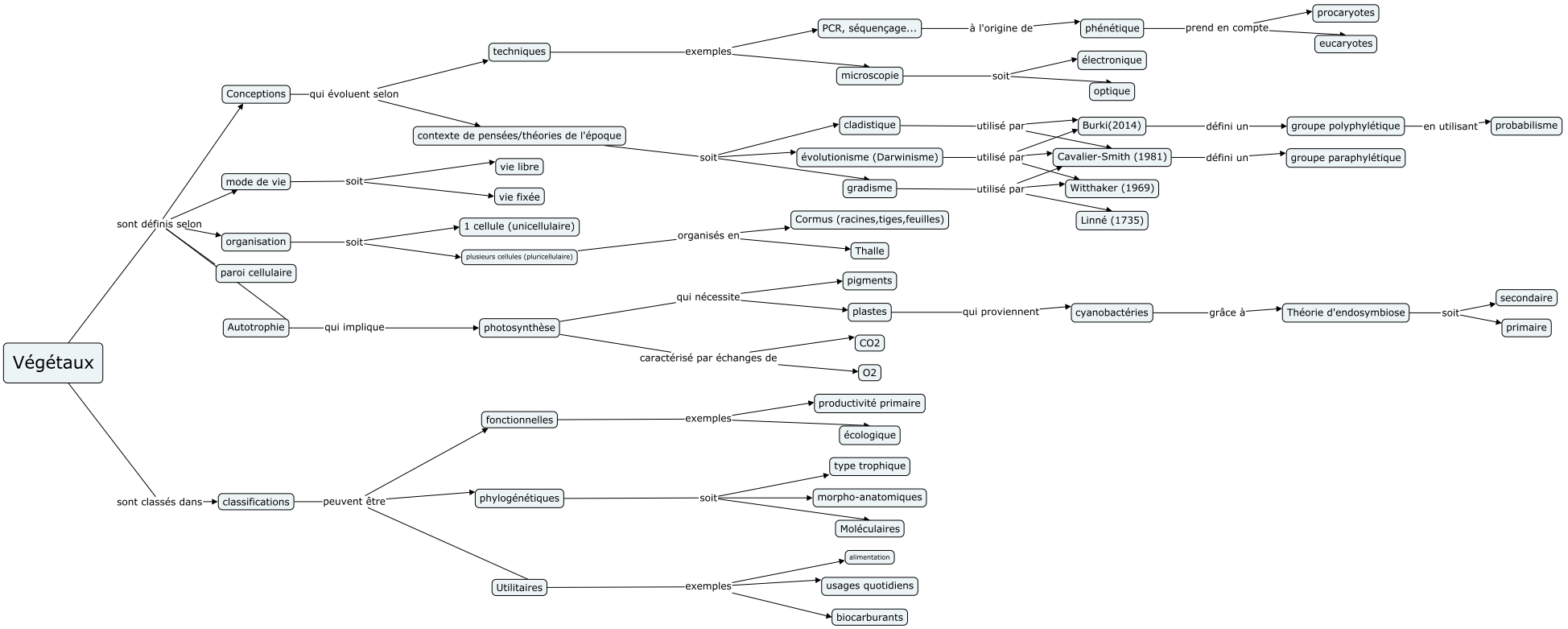


Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

7.4. Carte du groupe A6 (Romina et Tiphaine)

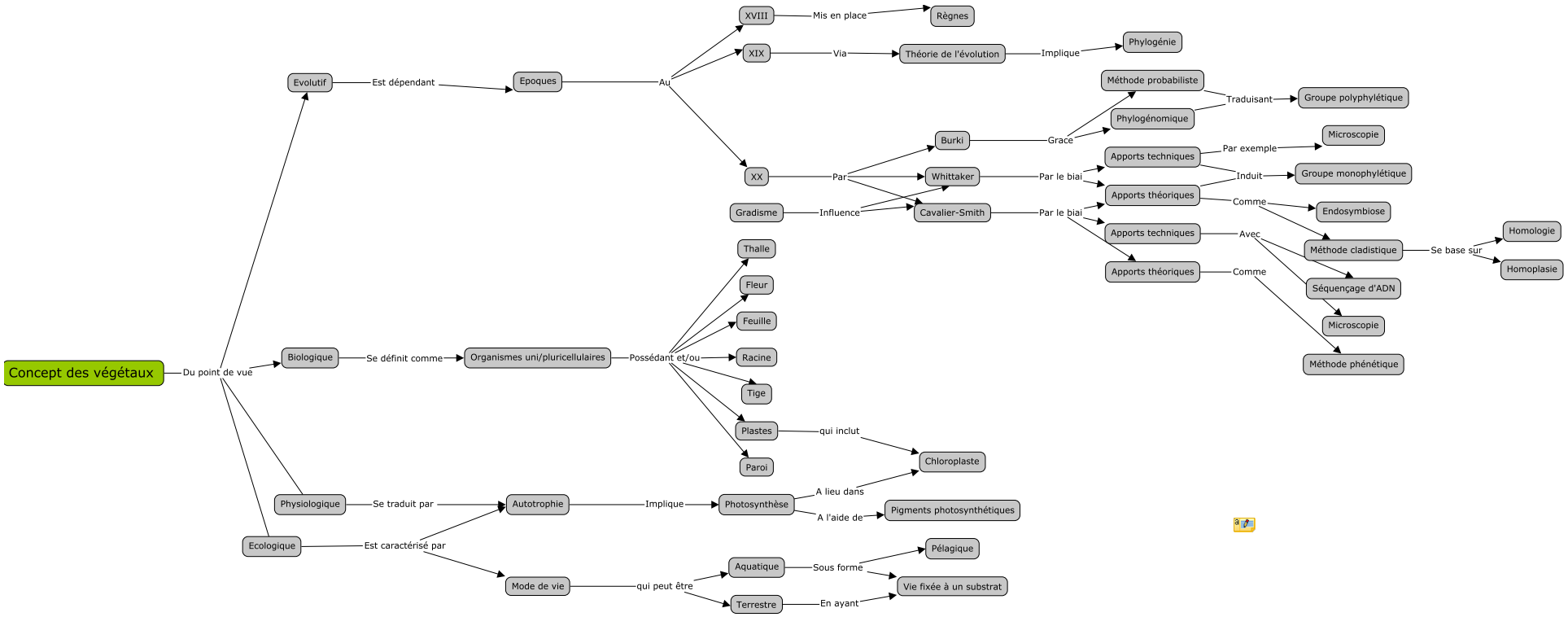


7.5. Carte du groupe A7 (Manuella et Helena)



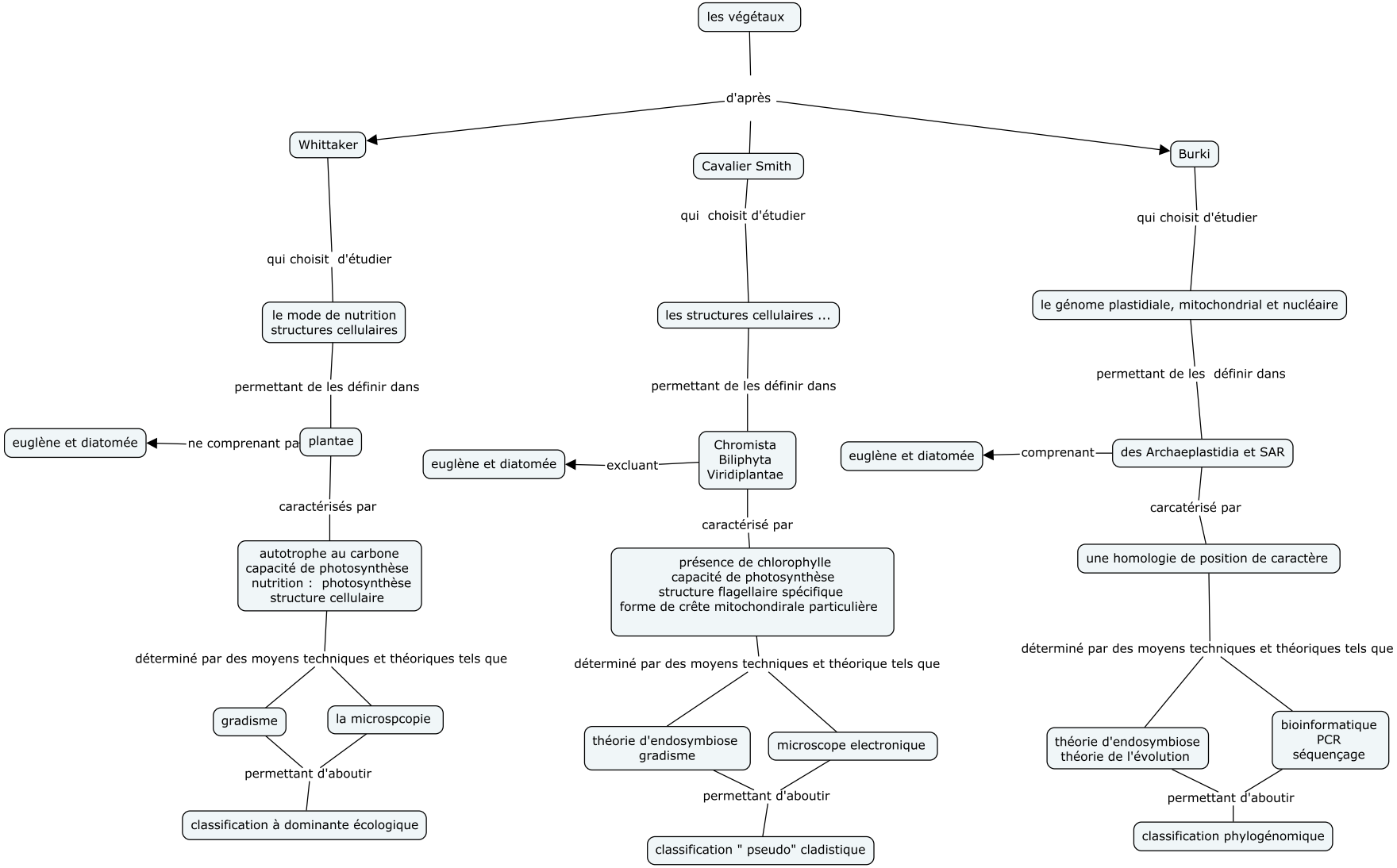
Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

7.6. Carte du groupe A8 (Marina et Valentino)

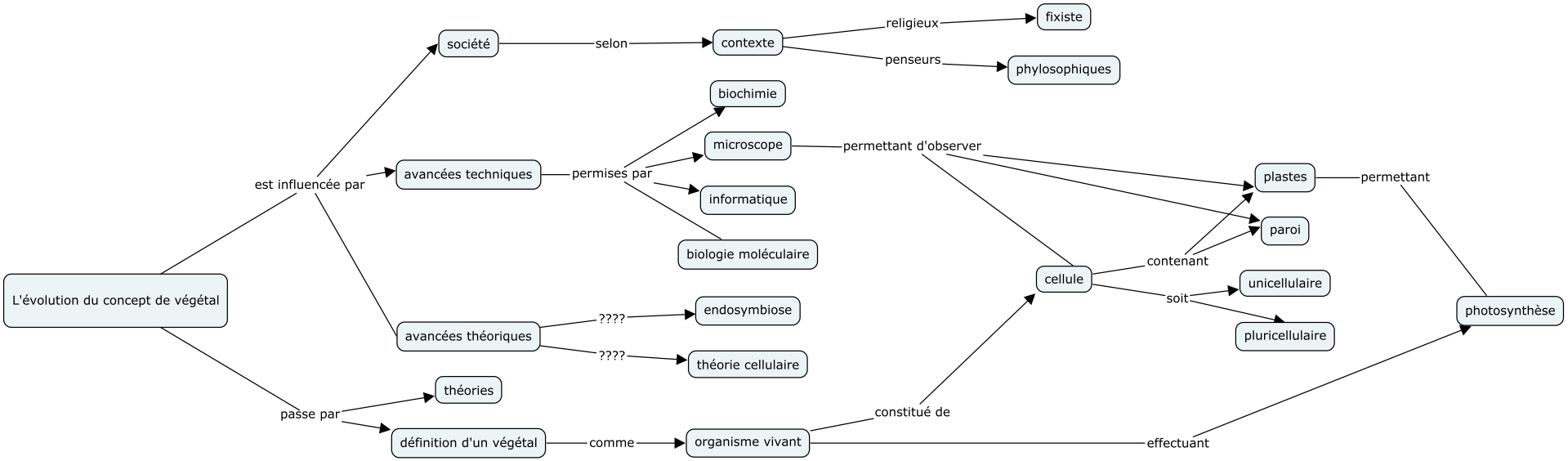


Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

7.7. carte du groupe B2 (Véronique et Evelyne)

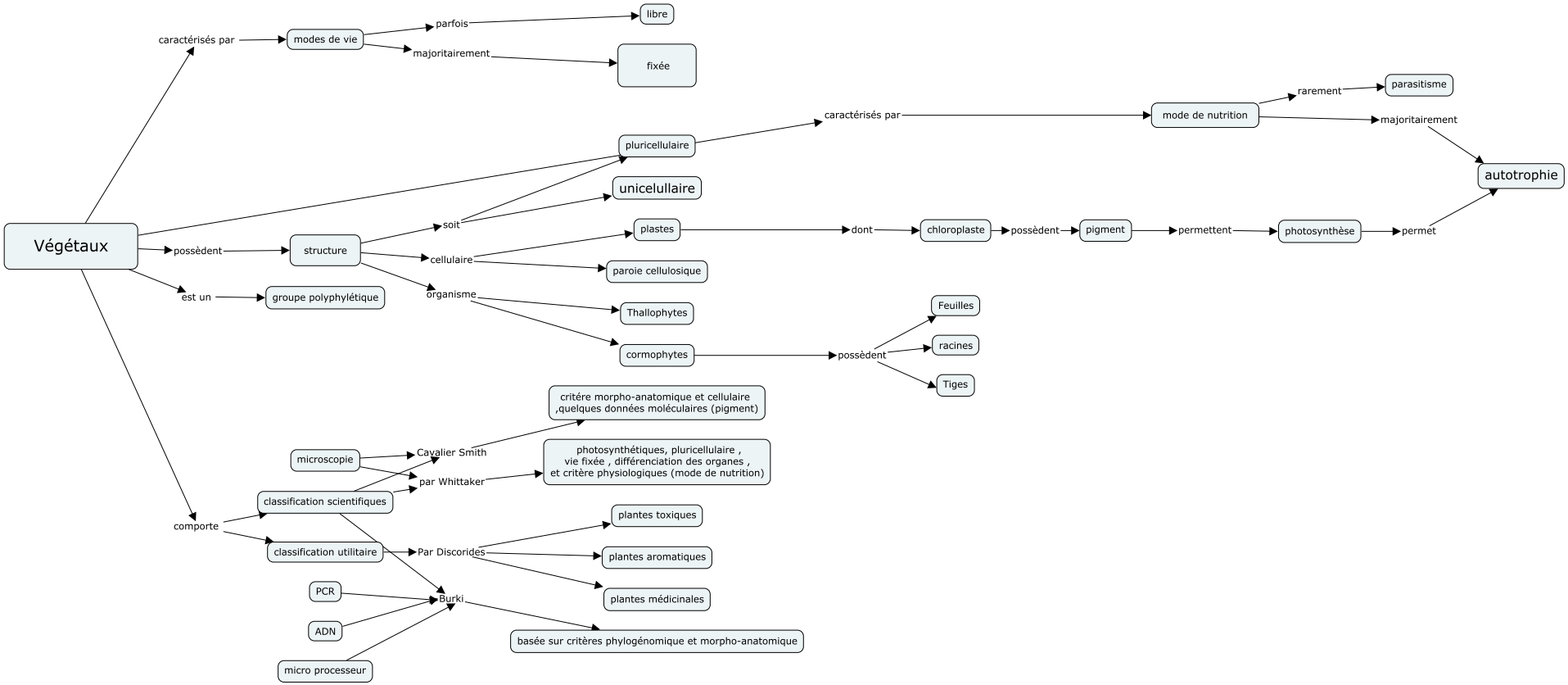


7.8. Carte du groupe B3 (Marco, Max et Guy)



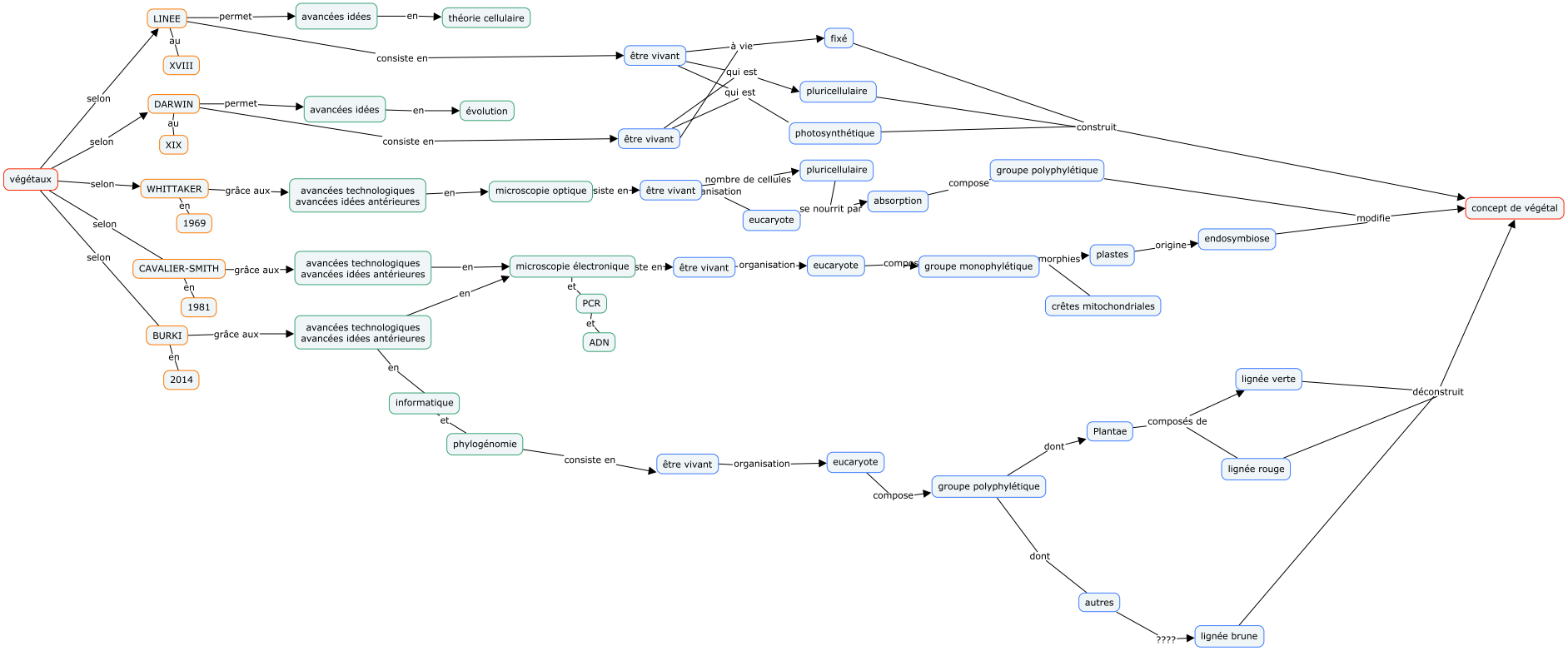
Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

7.9. Carte du groupe B4 (Benoît et Valérie)

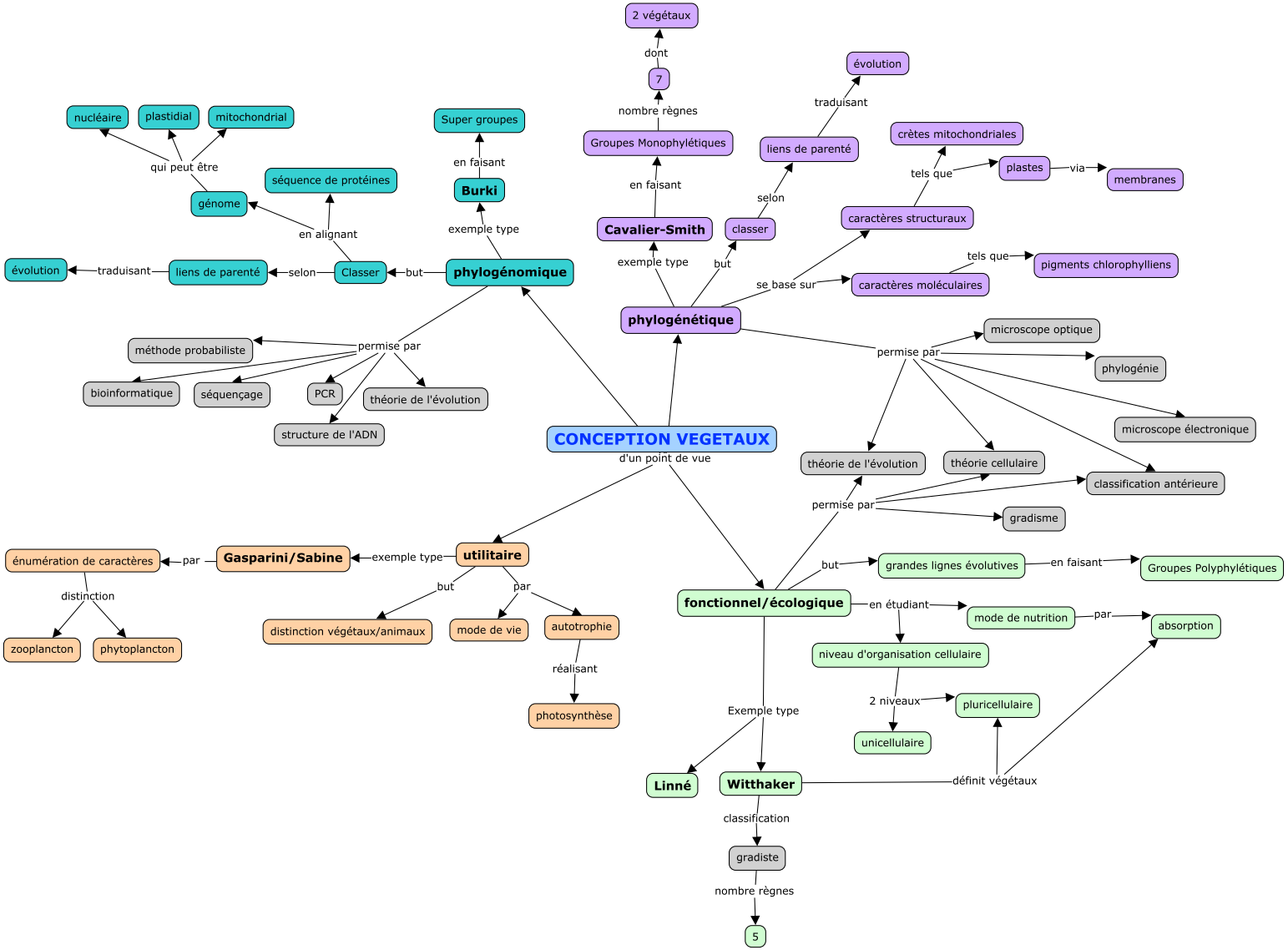


Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

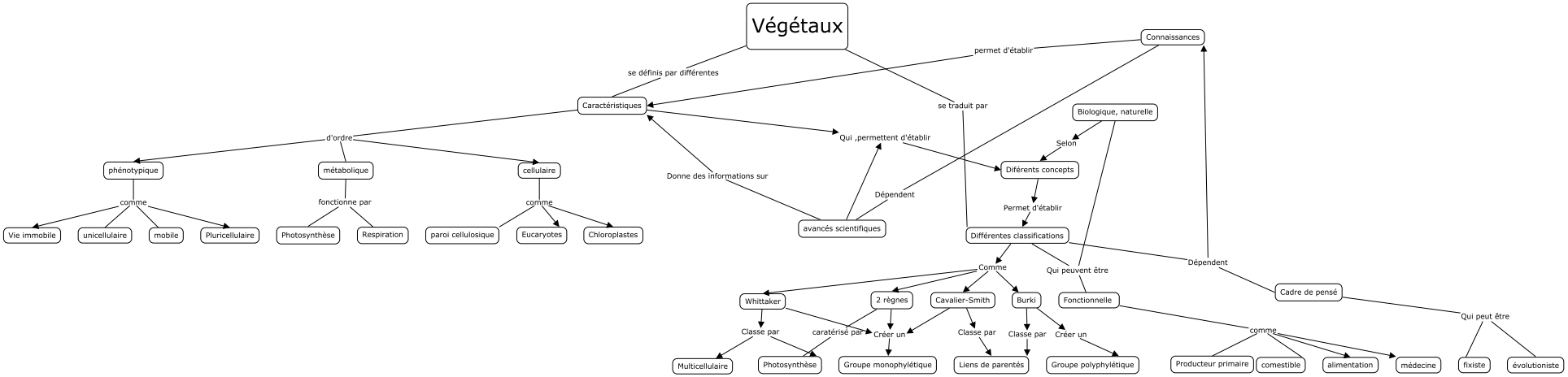
7.10. Carte du groupe B5 (Albane et John)



7.11. Carte du groupe B6 (Laureline et Marjo)

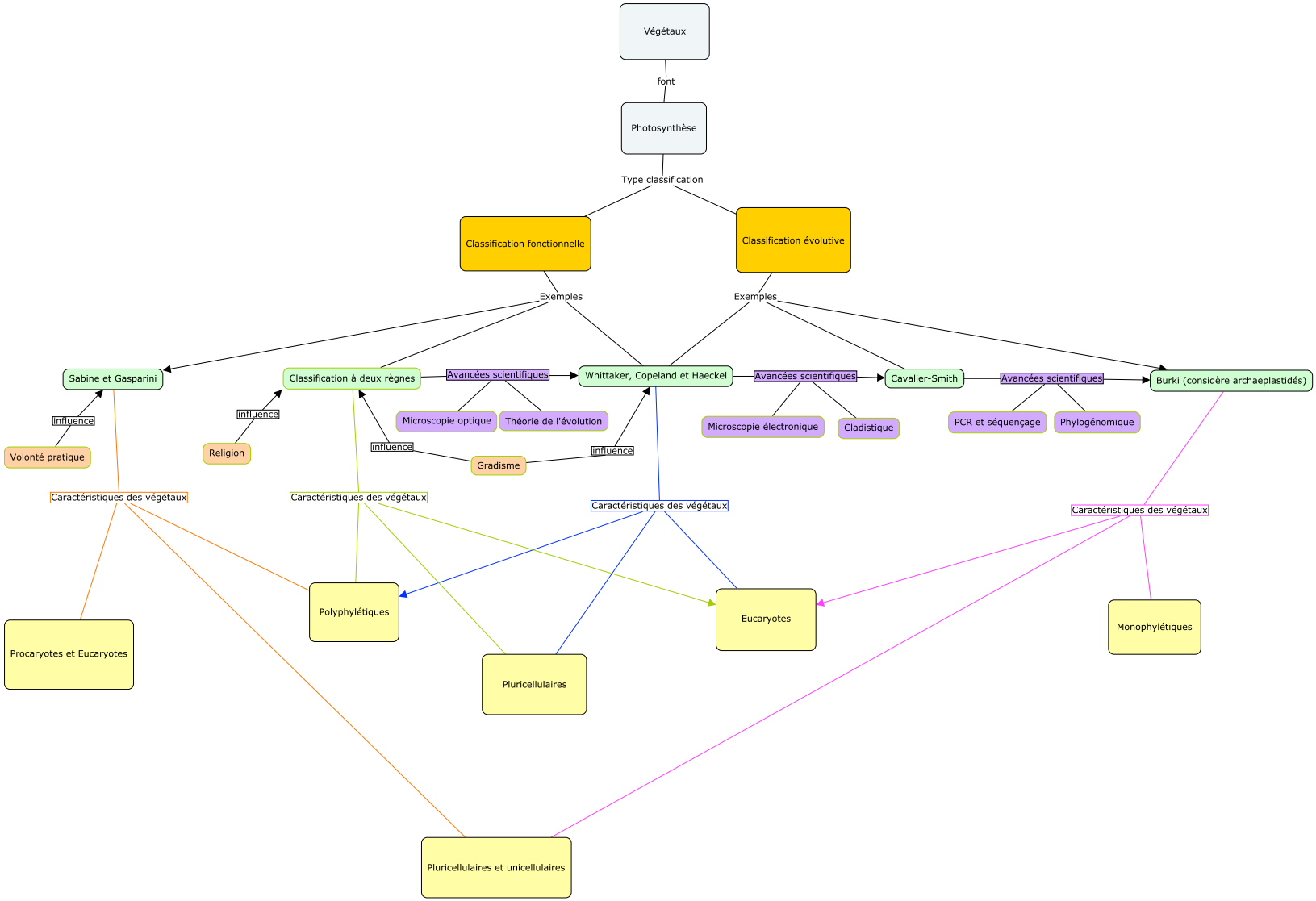


7.12. Carte du groupe B7 (Eric et Matthew)



Remise en forme automatique par nos soins (alignement horizontal)

7.13. Carte du groupe B8 (Caroline et Lara)



8. Propositions des treize cartes conceptuelles relatives aux termes dérivant du noyau lexical « phylogen »

Rappel du protocole permettant de rechercher toutes les occurrences d'un même mot dans l'ensemble des cartes : nous avons enlevé préalablement les majuscules, les accents, les pluriels, définit des synonymes et séparés des mots différents qui ont été rassemblés dans un même nœud.

Phylogen (10 cartes sur 13)	**Analyse**
A2: methode theorie comme phylogenomique	
A4: phylogenetique utilise methode probabiliste A4: non phylogenetique dont classification whittaker 1969 A4: phylogenetique utilise phenetique A4: pluralite classification type non phylogenetique A4: phylogenetique utilise cladistique A4: phylogenetique ou les vegetal sont polyphyletique A4: pluralite classification type phylogenetique A4: non phylogenetique dont classification cavalier smith 1981 A4: phylogenetique basee sur liens de parente	Présentation de la diversité de méthodes. Soulignons la difficulté à positionner la classification de Cavalier-Smith, qui certes n'est pas cladiste mais a une ambition phylogénétique (courant passé de la taxonomie : la « systématique évolutionniste »)
A6: phylogenetique exemple classification burki 2014 A6: phylogenetique exemple classification cavalier smith 1981 chromista biliphyta viridiplantae A6: vegetal conception phylogenetique A6: classification burki 2014 basee sur phylogenie moleculaire A6: phylogenie moleculaire grace a pcr A6: phylogenetique ???? liens de parente	Positionne différentes méthodes et auteurs. ??? : pas de connecteur sur le lien
A7: phylogenetique soit morpho anatomique A7: phylogenetique soit moleculaire A7: phylogenetique soit type trophique A7: classification peuvent etre phylogenetique	Diversité des caractères utilisés en phylogénie. Mais quelle est la signification des types trophiques (utilisés par Whittaker) en relation avec le terme phylogénétique car il s'agit d'homoplasie ?
A8: burki grace a phylogenomique A8: theorie de l evolution implique phylogenie A8: phylogenomique traduisant polyphyletique	Relation avec théorie (évolution), auteur (Burki) et résultats (polyphylétique)
B2: theorie d endosymbiose theorie de l evolution permettant d aboutir classification phylogenomique B2: bioinformatique pcr sequencage permettant d aboutir classification phylogenomique	Relation avec théories et techniques
B4: adn burki basee sur caractere phylogenomique morpho anatomique B4: bioinformatique burki basee sur caractere phylogenomique morpho anatomique B4: pcr burki basee sur caractere phylogenomique morpho anatomique B4: classification scientifique burki basee sur caractere phylogenomique morpho anatomique	Relation avec auteur (Burki), techniques, types de caractères étudiés (cf. figure 75)
B5: phylogenomique consiste en etre vivant B5: bioinformatique et phylogenomique	1ère proposition obscure car prend sa place dans un réseau conceptuel plus long (cf. carte en annexe)
B6: phylogenetique but classification B6: phylogenetique permis par theorie de l evolution B6: phylogenetique se base sur caractere moleculaire	Carte présentant beaucoup de nœuds dans le réseau conceptuel de la phylogénie / phylogénomique : relation avec auteurs, techniques,

B6: phylogenomique permis par bioinformatique B6: phylogenetique se base sur caractere moleculaire B6: phylogenomique permis par structure adn B6: phylogenomique permis par methode probabiliste B6: phylogenetique permis par theorie cellulaire B6: phylogenetique permis par microscopie electronique B6: phylogenetique permis par microscopie optique B6: phylogenomique permis par sequencage B6: phylogenetique permis par classification anterieure B6: phylogenomique exemple burki B6: phylogenomique but classification B6: conception d un point de vue phylogenetique B6: phylogenetique exemple cavalier smith B6: phylogenomique permis par pcr B6: phylogenomique permis par theorie de l evolution B6: conception d un point de vue phylogenomique B6: phylogenetique permis par phylogenie	théories (cf. figure 76):
B8: phylogenomique avancee scientifique burki archaeplastidae	Relation avec auteur et groupe monophylétique avec végétaux (Archaeplastidae) : est-ce une conception phylogénétique réduite (CPR) ? (cf. figure 77)

9. Analyse du débat relatif à la définition des végétaux dans l'article de Cavalier-Smith

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
483	Professeur	d'accord donc lui ce qu'il dit c'est ne le possédant pas tous il ne peut pas faire un groupe monophylétique c'est ce qu'il dit textuellement / pour ceux qui l'ont lu peut-être ce serait // donc est-ce que / je vais poser la question autrement / est-ce que les végétaux ont un contour dans cet article est que quand même il définit quelque chose comme étant végétal ?	Fin du débat sur les raisons de la non-monophylie des végétaux Formulation du problème de définition des végétaux
484	Marina W3	bah oui	Prise de position : il existe une définition des végétaux dans l'article
485	Professeur	oui / donc c'est sur la base de la photosynthèse	Reprise d'un argument qui avait fait l'objet de la discussion précédente
486	Laurène B2	non pas seulement	Opposition à l'idée que les végétaux soient définis seulement par la photosynthèse
487	Professeur	pas seulement alors quels sont les autres critères qui sont retenus pour faire un groupe des végétaux ?	Demande d'explicitation. Quelles sont les données fondant le groupe des végétaux
488	Evelyne C2	cellulaires	Thèse : végétaux définis par des caractères cellulaires
489	Professeur	cellulaires et quels critères cellulaires il retient ?	Demande de précisions, de données
490	Evelyne C2	la forme des crêtes mitochondriales	Apport de précisions (données) sur les caractères cellulaires utilisés par Evelyne qui a lu cet article
491	Professeur	ouais	
492	Evelyne C2	par exemple / il a aussi parlé du nombre de membranes plastidiales / structure des flagelles	Complément sur d'autres caractères cellulaires

493	Professeur	et qu'est-ce qu'il retient pour les végétaux dans tout ça ? est-ce qu'il y a des critères cellulaires qu'il retient pour les végétaux dans les crêtes mitochondriales les flagelles et tout ça ?	Demande d'une définition structurée des végétaux au regard des différentes propositions avancées
494	(silence assez long)		
495	Professeur	ça a l'air compliqué manifestement	
496	Evelyne C2	les pigments photosynthétiques	Caractère biochimique (pigments) impliqué dans la photosynthèse
497	Thomas B1	vous pouvez reposer votre question s'il-vous-plaît ?	
498	(discussion sur ce sujet non audible dans le groupe 2)		
499	Professeur	oui je voudrais juste savoir si finalement il fait un groupe des végétaux en disant qu'ils sont photosynthétiques mais peut-être pas tous finalement qu'est-ce qu'il retient pour définir les végétaux est que c'est un groupe qu'il définit finalement autrement que par la photosynthèse ou pas ?	Reformulation du problème de définition des végétaux
500	Aude C1	pas vraiment / enfin moi j'ai pas trouvé que spécialement il le définissait	Prise de position : pas de définition pour Aude, ayant lu cet article
501	Professeur	d'accord c'est pas défini / est-ce que pour d'autres / c'est valable pour tout le monde est-ce que c'est un groupe qu'est pas défini dans son article ?	Demande d'autres avis
502	Romina C2	si c'est défini / il regroupe les différents groupes selon des critères mais on les a pas notés donc on ne se souvient plus trop ce qu'il y avait	Désaccord de Romina Autre conclusion : il existe une définition mais n'a pas noté les critères. Ne reprend pas à son compte les caractères formulés précédemment par Evelyne
503	Professeur	d'accord donc euh / c'est un peu flou / c'est /	
504	Héloïse C3	non c'est pas clair	Modalisateur de doute
505	Professeur	j'laisse ça /	
506	Groupe 2	(chuchotement pas audible)	
507	Professeur	je laisse ça comme ça / vous n'avez pas de / rien d'autre à dire sur la définition des végétaux dans ce système là ce qu'il y a des règnes ? / est il y a des	Reformulation de la question initiale pour relancer l'argumentation : existence de règnes (sous-entendu végétaux)
508	Laurène B2	oui	Prise de position : il existe des règnes (sous-entendu végétaux)
509	Héloïse C3	oui les quatre [groupes	Précision : quatre règnes
510	Evelyne C2	il y a trois groupes]	Proposition d'un nombre différent (3)
511	Aude C1	il y a que quatre groupes	Accord avec Héloïse : quatre règnes
512	Professeur	et parmi ces règnes est-ce que certains sont végétaux ou pas / est-ce qu'il dit est-ce qu'il regroupe ces règnes là en ensembles ou la	
513	Evelyne C2	il a six règnes	
514	Professeur	ouais	
515	Evelyne C2	enfin nous on en a compté six il y en a trois qui sont / qui font partie des végétaux	Prise de distance avec le nombre de groupes avancé par Héloïse et Aude (4) Trois règnes végétaux parmi les six règnes d'eucaryotes
516	Professeur	d'accord donc ça a quand même un contour du coup	
517	Evelyne C2	ouais il y a les viridiplantae les biliphyta et les chromista / dans le / groupe qu'il a	Explicitation des 3 règnes végétaux dont l'un (Chromista) est subdivisé en deux

		subdivisé en cryptophyta et chromophyta	autres
518	Professeur	donc il y a trois règnes qui définissent les végétaux tout en ayant d'un côté en disant qu'on ne peut pas faire un groupe monophylétique des végétaux c'est ça ? non je ne sais pas j'essaie juste de / de voir parce que plutôt vous m'avez dit que	Question visant à mettre en relation deux thèses : pas de groupe monophylétique des végétaux et existence de trois règnes végétaux => quelle est la nature de la relation phylogénétique entre les trois règnes végétaux ?
519	Romina C2	bah ça veut pas forcément dire que les trois groupes ont un ancêtre commun mais ça il n'en parle pas vraiment c'est ça qui nous a posé problème parce qu'il dit qu'il y a trois groupes monophylétiques / mais après est-ce / est-ce qu'on / est-ce que que ça forme après un groupe monophylétique ces trois groupes là ? nous on a plutôt pensé que non mais sans que ça soit vraiment marqué explicitement	Explication : les trois règnes végétaux ne sont pas monophylétiques Caractère non explicite Reformulation de la question : rôle de tiers (Plantin, 2006) Réponse (rôle de proposant) Mais cela reste implicite
520	Professeur	OK / très bien / alors question par rapport aux euglènes est-ce qu'elles seraient végétales dans cette classification et pareil pour les diatomées ou pas ?	Formulation de la question liée à l'item suivant de la grille

10. Analyse du débat relatif à la définition des végétaux dans l'article de Burki (2014)

10.1. Débat interne au groupe 1 (phase préparatoire au débat collectif)

Thomas et Helena sont les deux membres du groupe de 5 étudiants à avoir lu l'article de Burki

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
1	Thomas	alors voilà que sont les végétaux dans la classification? / je t'écoute	
2	Helena	donc / euh (rire) // ce serait les organismes photosynthétiques / possédant des plastes / et ils peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires / là il donne pas de / enfin / lui pour lui ça peut être les deux / euh donc euh ils font partie de différents sous-groupes / euh excavates archaeplastidia et les SAR s a r (elle épelle le sigle)	Thèse A de l'existence des végétaux pour Burki. Conception fonctionnelle et cellulaire. Plusieurs sous-groupes
3	Thomas	alors là c'est marrant parce que nous on n'a pas trouvé ça du tout	Opposition
4	Helena	d'accord	
5	Valentino	ah	
6	Thomas	en fait / en fait du coup je pense qu'on va vachement dériver ensuite / par la suite / parce que pour nous / clairement les SAR et les excavates c'est pas des végétaux / enfin [	Thèse alternative B: les SAR et les excavates (comprenant des organismes photosynthétiques avec plastes) ne sont pas végétaux.
7	Helena	d'accord]	
8	Thomas	d'après lui / c'est-à-dire qu'on n'a pas trouvé de / en fait on n'a pas trouvé de définition du groupe végétal donc à	Pas de végétaux dans l'arbre phylogénétique donc groupe

		mon avis pour lui c'est plutôt un groupe [polyphylétique	polyphylétique Loi de passage implicite : un groupe n'existe en phylogénie actuellement que c'est s'il est monophylétique
9	Valentino	polyphylétique]	
10	Thomas	a priori mais il le mentionne pas donc on sait pas trop / donc en fait comme on est / il inclut un groupe qu'il appelle plantae donc c'est les archaeplastida / donc c'est le groupe que vous voyez en vert ici (montre la figure dans l'article) / dans lequel il inclut les / les algues rouges les glaucophytes et les viridiplantae / les plantes vertes	Modalisateur de doute Donnée : dans l'arbre il existe un groupe monophylétique appelé Plantae ou Archaeplastida
11	Aude	plantes terrestres	
12	Thomas	plantes terrestres et donc euh / et après / au niveau des / je suis obligé d'aller plus loin parce qu'au niveau des / caractères qu'il va utiliser / si on se base juste sur le groupe archaeplastida / il parle juste de la présence du plaste qui résulterait d'un phénomène d'endosymbiose unique / et qui sera en fait la synapomorphie du groupe des archaeplastida	Groupe basé sur un plaste résultant de l'endosymbiose primaire (synapomorphie du groupe) => Sous-entendu : en phylogénie on définit un groupe par ses synapomorphies
13	Helena	donc pour toi les algues pour lui ce serait pas des végétaux	Question de la place des algues parmi les végétaux, venant en objection à la thèse de Thomas
14	Valentino	(pendant ce temps Valentino simule des coups de poing pour indiquer la "castagne" correspondant au débat entre Helena et Thomas)	
15	Thomas	les algues quelles algues ?	Échange sur la place des algues
16	Helena	les algues en général	
17	Thomas	bah si / vu qu'il met les algues rouges dedans	
18	Helena	parce que dans les SAR il inclut des groupes d'algues	
19	Thomas	ouais / ouais complètement / mais en fait nous est parti / à partir du moment où on a vu plantae archaeplastida / même s'il ne donnait pas de définition générale euh / enfin	Végétaux réduits aux Archaeplastida, un groupe monophylétique (conception phylogénétique réduite)
20	Helena	ouais mais ça veut dire que tu exclus / certains groupes d'algues / des végétaux / [puisque	Objection : les algues sont forcément toutes végétales
21	Thomas	bah ouais]	
22	Helena	il y a en certains qui sont là (montrant sur la figure le groupe SAR)	
23	Thomas	ouais je pense ouais / enfin moi c'est comme ça que j'ai compris	
24	Helena	moi je dis il précise pas en fait / il précise pas que les végétaux ce serait que / ceux-là (montrant les archaeplastida sur la figure) / sans les algues qui sont aussi là (montre le groupe SAR sur la figure)	Il n'y a pas de raison d'exclure des végétaux les algues du groupe des SAR [Ne cherche pas à retenir uniquement des groupes monophylétiques]

25	Thomas	pour moi il a pas donné définition des végétaux / [enfin il	
26	Helena	voilà]	Consensus sur l'absence de définition explicite des végétaux
27	Thomas	mais après par contre du coup ça va être intéressant / les euglènes pour toi il les met dans les végétaux ou pas ?	Recherche des conséquences de la divergence de conclusion sur la nature des végétaux concernant les deux espèces « repère »
28	Helena	euh attends (elle regarde ses notes) / euh oui / parce que du coup ils étaient dans le	L'euglène est végétale pour Helena
29	Thomas	c'est un excavate / pour lui	
30	Helena	euh ouais attends / il le dit clairement mais / je sais plus c'est dans quelle / euh oui les excavates / mais du coup pour moi oui	
31	Thomas	d'accord bah pour moi	
32	Valentino	pour vous aussi ?	
33	Thomas	(fait un signe de la main)	
34	Valentino	non pour vous non	
35	Thomas	bah moi j'ai dit qu'on ne pouvait pas répondre	Passage à une autre thèse C (pas encore clairement formulée) : on ne peut pas répondre pour l'euglène En effet selon la thèse « végétaux = Plantae=Archaeplastida », l'euglène n'est pas végétale
36	Helena	il a des / des / lui il dit des plastes euh [d'origine	Euglène végétale car ayant des plastes => théorie A basée sur la CFC
37	Thomas	d'origine d'algue verte]	
38	Helena	d'algue verte	
39	Thomas	ouais / ouais il le dit je suis d'accord mais pour moi on ne peut pas répondre / il dit que ce n'est pas un archaeplastida / il est pas dans le groupe des plantae / euh mais il dit que c'est quand même un / c'est un excavate / c'est ce groupe là (il montre le groupe des excavates sur la figure) / il place les euglènes ici / c'est un excavate qui a un plaste d'origine algue verte et c'est aussi un protiste photosynthétique / mais euh / à partir du moment où il n'a pas défini le / le groupe [des végétaux	On ne peut pas répondre sur le fait que l'euglène soit végétale car les végétaux ne sont pas définis
40	Helena	pour moi] c'est un peu exclusif de dire / euh il considère que les planta / [les plantae là	Objection : refuse de limiter les végétaux aux seuls Plantae = Archaeplastida
41	Thomas	les plantae c'est les végétaux / bah je sais pas	Hésitation / doute concernant la thèse végétaux = Plantae
42	Helena	parce que du coup	
43	Thomas	je t'avoue que pour moi comme il n'a pas défini les végétaux en tant que tel / c'est pas clair quoi	Doute
44	Valentino	hum / la preuve vous êtes pas d'accord entre vous	
45	Thomas	enfin / clairement dans sa classification	Changement de position par rapport à la

		le groupe des végétaux il n'a plus lieu d'être / on verra après il défonce les termes de règne / tout ça	thèse B « Végétaux = Archaeplastida » et passage à la thèse C « les végétaux n'existent plus »
46	Valentino	ah ouais	
47	Thomas	il défonce tout ce qui est terme de règne de	
48	Florent	il l'abolit	
49	Thomas	ouais	
50	Helena	parce que tu vois dans les opisthocontes / il parle clairement d'animaux et euh / champignons	
51	Thomas	ouais / ça c'est vrai	
52	Helena	et après	
53	Thomas	mais pas de végétaux	
54	Helena	bah / disons que / euh il dit pas végétaux / mais il les inclut pas du tout dans celui-là (en montrant le groupe plantae sur la figure) / enfin	Refus de la thèse B « végétaux = Plantae (Archaeplastida) »
55	Thomas	non il ne dit pas du tout que c'est que les archaeplastida / il / mais / enfin il en parle pas des végétaux en tant que tel / le groupe des végétaux il en parle pas / il sépare bien les organismes / genre les diatomées il les met dans / par exemple les SAR / les euglènes il les met dans les excavates /il a son groupe des plantae	Accord pour invalider la thèse B « végétaux = Plantae (Archaeplastida) » Végétaux « éclatés » dans l'arbre des eucaryotes
56	Aude	(soupir et sourire à Valentino et Florent, en assistant au complexe débat entre Héloïse et Thomas)	
57	Helena	euh ouais / ouais mais du coup il faut savoir si pour lui / une algue c'est un végétal ou pas ? / parce que dans ce cas-là euh / mais on peut pas savoir dans le texte	Retour sur l'exemple prototypique des algues
58	Thomas	bah	
59	Helena	tu vois ?	
60	Thomas	ouais je vois / enfin clairement / enfin toutes les algues ne sont pas des/ bah on sait pas	
61	Helena	on sait pas	
62	Thomas	il a pas défini végétaux alors	Végétaux non définis
63	Helena	bah c'est pas clair	
64	Florent	c'est incertain mais je pense qu'il faut avancer car on a un temps limité	
65	Valentino	et pour les diatomées du coup	Passage à la seconde espèce « repère »
66	Helena	les diatomées c'est pareil	Chacun reste sur sa position
67	Thomas	ouais pareil / en fait c'est pas un archaeplastida / c'est un SAR / enfin straménophile en fait	
68	Valentino	c'est un straménophile	
69	Helena	mais du coup	
70	Thomas	et la présence de plaste n'est pas précisée / chez les diatomées	
71	Helena	ça dépend	Changement de position ?

72	[Florent	(parlant à Thomas) mais lesquels SAR sont des	
73	Valentino	donc toi t'as mis oui (s'adressant à Helena) et toi t'as mis non (s'adressant à Thomas)	Rôle de tiers exercé par Valentino
74	Thomas	mais il n'y a pas définition des végétaux	
75	Florent	mais selon une définition des végétaux]	
76	Thomas	moi j'ai mis on peut pas répondre	Thèse C on ne peut pas répondre si la diatomée est végétale
77	Helena	parce que du coup il met bien les animaux dans les opisthocontes / et après dans tous les autres groupes / il parle de / d'organismes [(s'adressant à Valentino) / avec des plastes et tout / parce que lui sa définition c'est / organismes avec des plastes / c'est plutôt vers les végétaux	Formulation de la thèse A : « végétaux : organismes avec des plastes »
78	Valentino	d'accord	
79	[Florent	(discussion en parallèle de l'échange entre Helena et Valentino) les euglènes ils sont classés dans quoi ?(parlant à Thomas pour remplir sa grille à l'issue de la discussion)	
80	Thomas	on ne peut pas répondre	
81	Florent	oui mais ils sont classés dans quoi ?	
82	Thomas	c'est un excavate]	
83	Valentino	toi t'as mis quoi ? (s'adressant à Thomas)	
84	Thomas	moi j'ai mis qu'on peut pas répondre	Rappel de la sa position « on ne peut pas répondre » (thèse C)
85	Valentino	on peut pas répondre	
86	Thomas	parce que le groupe des végétaux il existe [plus	Car le groupe des végétaux n'existe plus dans la classification actuelle
87	Helena	ouais]	
88	Thomas	quand tu regardes / [effectivement	
89	Helena	mais le truc c'est que t'étais d'accord avec la / la / quels sont les végétaux dans la classification ? / et nous / t'étais d'accord avec photosynthétiques et possédant des plastes / ah non c'était pas	
90	Thomas	non	
91	Helena	bah non du coup	
92	Thomas	non non moi j'ai dit il n'explicite pas le groupe des végétaux / pour moi / clairement / en fait si on compare aux anciennes classifs on va y arriver / mais euh / t'avais en gros	
93	Valentino	le règne	
94	Thomas	le règne animal et le règne végétal	
95	Florent	là il y a toujours un peu de règne animal	
96	Thomas	ouais voilà / si tu pars là-dessus (montre la figure de Whittaker) / en fait le plantae il l'éclate complètement	Les végétaux au sens de Whittaker (Plantae ancienne extension) sont polyphylétiques (« éclatés » dans l'arbre)
97	Valentino	ouais	

98	Thomas	clairement avec tout ce qu'il dit / il le met un peu partout / genre les phéophytes ils arrivent chez les straménophiles enfin tout ça / dont il l'éclate complètement / et il garde plus ou moins/ même il le garde assez bien / les méta euh les animaux et les végétaux (lapsus avec champignons) qu'il mêle au sein des opisthocontes / tu vois donc en fait / par rapport à la classification / si on se base par exemple si on compare à Whittaker	Précise le caractère polyphylétique avec des exemples
99	Valentino	ouais	
100	Thomas	il garde plus ou moins deux groupes / j'imagine qu'il y a quand même des différences au niveau de certains organismes de certains groupes / mais par contre les plantes piou (onomatopée représentant une explosion) il les	
101	Valentino	il les éparpille	
102	Thomas	ouais	
103	Valentino	OK / d'accord	
104	Thomas	enfin moi c'est comme ça que je le vois	
105	Helena	oui	Accord sur le caractère polyphylétique des végétaux au sens de Whittaker
106	Thomas	du coup par rapport aux classifs antérieures ?	Passage à la question suivante de la grille d'analyse

10.2. Débat collectif (épisode 23)

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
630	Professeur	d'accord / alors quand tu dis c'est clairement un but de classer c'est-à-dire obtenir des liens de parenté est-ce qu'on classe que selon les liens de parenté ? // enfin en tout cas établir des liens de parenté d'accord / d'accord alors que sont les végétaux dans cette classification là ?	Fin de l'épisode 22 sur l'objectif de la classification de Burki Formulation de problème de définition des végétaux
631	Manuella B3	c'est les organismes photosynthétiques qui possèdent des plastes / unicellulaires ou pluricellulaires	Proposition d'une thèse A correspondant à la conception fonctionnelle et cellulaire (que Manuella avait d'ailleurs mobilisé dans le questionnaire pré-séquence)
632	Professeur	alors ça c'est mentionné en tant que tel ou c'est une inférence que tu fais toi ?	Question sur le caractère explicite ou supposé de la définition
633	Thomas B1	ben nous on a eu un petit débat interne / (rire d'Helena) en fait le groupe végétaux il n'est jamais mentionné dans l'article / jamais / il n'est jamais mentionné dans l'article il n'a pas de caractéristiques qui sont vraiment données proprement	Analyse du débat interne au groupe 1 pendant la première phase de la séance Pas de définition explicite
634	Professeur	d'accord	
635	Aude C1	c'est un [groupe polyphylétique	
636	Professeur	est-ce qu'au moins vous êtes d'accord tous] sur le fait que le groupe ne soit pas mentionné ?	
637	Plusieurs personnes	oui	Accord sur l'absence de définition explicite
638	Professeur	est-ce que ça c'est quelque chose de	

		consensuel ?	
639	Florent W1	ouais	
640	Professeur	alors du coup / sur quoi tu t'es basée pour dire organismes photosynthétiques / il y a plastes et cetera / qu'est-ce que t'as fait pour dire ça ?	Questions sur les données fondant la thèse d'une définition fonctionnelle et cellulaire (CFC) des végétaux
641	Manuella B3	euh / je sais plus / bah / j'sais plus dans une phrase il parlait des plastes et / des algues vertes	Modalisateur de doute Donnée cellulaire liée aux plastes [Concernant les algues vertes, il s'agit de l'origine des plastes des euglènes, cf. débat interne du groupe 1, Manuella ayant analysé l'article avec Helena]
642	Professeur	mais est-ce que c'est quelque chose qu'il y avait d'écrit dans le texte ou c'est toi qui regardant ce texte a essayé de de retrouver quelque chose que tu connaissais	Nouvelle question sur le caractère explicite ou supposé de la définition
643	Manuella B3	oui j'en ai déduit ça / il y avait pas / ouais c'est plutôt / la deuxième euh / enfin c'est c'est pas / il y a pas une phrase une définition claire des végétaux	Non explicite. Inférence. Pas de définition claire des végétaux
644	Professeur	d'accord donc pour toi pour que tu dises ça / tu te bases par rapport à [quoi	
645	Manuella B3	à partir de]	
646	Professeur	de tes connaissances ? de l'idée que tu t'en fais ?	
647	Manuella B3	oui bah oui de nos connaissances mais aussi de certains termes qu'il utilise du coup / parce qu' il parle de plastes donc tout de suite effectivement je vais mettre cela dans la définition	Données : les connaissances préalables Reconstruction de la définition non explicite sur la base des connaissances et de l'utilisation du terme plaste dans l'article
648	Professeur	alors faudrait peut être qu'on s'entende / qu'est-ce qu'on met dans cette case / est-ce qu'on met finalement végétaux égal rien / est-ce qu'on met végétaux égal quelque chose / qu'est-ce qu'on fait ?	Question intégrant une seconde thèse alternative : les végétaux n'existent pas pour Burki (« végétaux égal rien »)
649	Thomas B1	bah le terme végétaux étant pas utilisé / par rapport à Burki lui-même c'est un peu étonnant / après c'est sûr vis-à-vis de nos connaissances / enfin on peut dire c'est un groupe polyphylétique étant donné que / mais après enfin après ça dépend des caractéristiques qu'on lui donne à ce groupe aussi enfin c'est un peu / effectivement si on dit un organisme photosynthétique qu'a des plastes blablabla on va retrouver / dans ces cas-là des végétaux on va en retrouver partout que ce soit chez les SAR que ce soit chez les excavates enfin on va en retrouver partout	Nos connaissances, sous-entendu groupe de végétal tel qu'il était défini antérieurement (par Whittaker par ex ou bien CFC) => recherche de la position dans l'arbre => déduction de la nature polyphylétique de l'ancien groupe végétal Formulation d'une position indiquant qu'il n'existe pas un groupe des végétaux de manière absolue
650	Professeur	ouais	
651	Thomas B1	du coup / en fait le groupe	
652	Professeur	et l'auteur lui / c'est ça qui nous intéresse finalement on essaie de retranscrire ce que nous dit un auteur sur la classification / est-ce que cet auteur là / pour lui végétaux a une existence est-ce que c'est mentionné est-ce qu'il le définit est-ce que / oui (s'adressant à Thomas qui	Déplacement du questionnement : de « nous » à « l'auteur ». Que sont les végétaux pour Burki ? Implicitement cela revient à demander ce que veut dire définir dans une approche cladistique moderne

		veut prendre la parole)	
653	Thomas B1	bah après c'est sûr que si on compare par rapport à Whittaker et à ses trois grands règnes supérieurs qui sont animaux fungi et plantae / les animaux et les fungi on les retrouve chez les opisthocontes mais les végétaux ils sont complètement éclatés maintenant / si on se base là-dessus / dans les végétaux de Whittaker il y avait / enfin je peux voir l'image / (tourne les pages de l'article de Whittaker) / par exemple dans les plantae de Whittaker il y avait les phéophytes par exemple qu'on retrouve aujourd'hui chez straménophiles	Reprise plus détaillée de l'argumentation précédente expliquant le polyphylétisme des végétaux tels que Whittaker les définissait Donnée précise, exemple pour illustrer la thèse de l'éclatement des végétaux (tels qu'ils étaient définis par Whittaker
654	Florent W1 (?)	piles	
655	Thomas B1	straménopiles pardon / ah oui straménopiles	
656	Professeur	OK	
657	Thomas B1	voilà les charophytes aussi il n'y sont plus je crois	Recherche d'un autre exemple
658	Professeur	mais là ils ne sont pas expressément mentionnés	
659	Laurène B2	ah s'ils ne sont pas mentionnés [c'est que	Thèse C alternative à la thèse initiale formulée par Manuella : les végétaux n'existent pas pour Burki
660	Romina C2	pour lui ça n'existe pas]	
661	Laurène B2	pour lui ça n'existe pas oui	
662	Thomas B1	d'autant plus que après on verra / cela répondra peut être à la question d'après	
663	Professeur	je ne suis pas en train de prendre parti en quoi que ce soit je veux juste savoir si je mets rien ou si je mets quelque chose	
664	Laurène B2	pour moi ce serait rien	Pas de définition car plus d'existence du groupe des végétaux
665	Thomas B1	ouais pour moi aussi	
666	Professeur	(s'adressant à Manuella) alors et toi est-ce que tu veux mettre quelque chose puisque c'est toi qui nous a donné une définition / est-ce que t'as envie de mettre quelque chose ou pas	Donne la parole à Manuella, ayant formulé la thèse initiale de l'existence des végétaux, pour faire avancer la controverse
667	Héloïse C3	(chuchotant à son groupe) du fait qu'il parle pas des végétaux est-ce que ça le euh	
668	Manuella B3	forcément les végétaux existent pour lui on est en 2014 / mais il n'en parle pas / enfin explicite / voilà	Opposition à la thèse de la non-existence des végétaux pour Burki : « Forcément les végétaux existent pour lui »
669	Professeur	est-ce que ça existe pour lui / ou est-ce que ça	
670	Manuella B3	un groupe monophylétique non / mais les végétaux existent / enfin je pense (petit rire)	Ils existent même si leur statut phylogénétique a évolué et ne sont pas monophylétiques
671	Professeur	et selon les critères qu'il utilise est-ce que ça existe ?	Nouvelle question du professeur
672	Manuella B3	oui	Confirmation de la thèse avec assurance
673	Professeur	ou pas ?	
674	Manuella B3	oui //	Nouvelle confirmation
675	Professeur	si on prend [le but de départ de la classif quel était le but de la classif ?	
676	Manuella B3	c'est bizarre d'hésiter parce que c'est	Manuella n'arrive pas à comprendre que

		tellement	l'on puisse remettre en question l'existence des végétaux
677	(discussion en parallèle au sein du groupe 3 pendant que le professeur parle)		
678	Benoît W3	justement il disait que / les végétaux c'était fini quoi	Soutien de la thèse C de non-existence des végétaux dans la classification actuelle
679	Manuella B3	ah ouais ?	Modalisateur de doute : un début de remise en cause de sa position (se sentant esseulée ?) ?
680	Héloïse C3	ils ont quitté du vocabulaire en fait]	Soutien de la thèse C : le mot « végétal » n'existe plus dans le vocabulaire de la systématique actuelle
681	Thomas B1	placer les eucaryotes et placer une racine à son groupe	
682	Professeur	placer les eucaryotes les uns par rapport aux autres et placer une racine	
683	Thomas B1	c'est clairement dit dans son introduction c'est ce qu'il veut	
684	Professeur	d'accord / et on avait dit a priori il faisait / il voulait faire de la phylogénie	Rappel du contexte phylogénétique
685	Thomas B1	ouais	
686	Professeur	OK / donc par rapport à ça qu'est-ce que je mets ? je veux juste une réponse maintenant je voudrais que vous mettiez d'accord pour voir ce que j'écris	Rôle de tiers joué par le professeur afin de faire avancer l'argumentation et la problématisation
687	Thomas B1	bah le truc c'est qu'on n'est pas d'accord	Désaccord entre les deux thèses
688	Professeur	on laisse le désaccord apparent	Désaccord entre les deux thèses
689	Thomas B1	bah je sais pas mais pour moi les végétaux il n'en parle absolument pas et euh / il a un groupe qui peut / enfin si on globalise / il un groupe qui ressemble le plus aux végétaux c'est les archaeplastida / mais comme il parle pas de végétaux / on ne peut pas dire que ce sont les végétaux en tant que tel on a envie c'est sûr on a envie / la branche elle est verte on voit qu'il y a un maximum de choses qu'on appelle les végétaux là dedans il y a les gymnospermes les angiospermes les bryophytes ceux qu'on connaît le plus	Vers une autre thèse (B) : Le terme « végétaux » est absent mais il y a une lignée valide (Archaeplastida) comprenant beaucoup de groupes appartenant aux végétaux (au sens plus ancien) => les végétaux seraient réduits à la lignée des Archaeplastida (cf. débat interne du groupe 1) Mais introduction d'une nuance. Il énonce une thèse mais en même temps dit qu'« on ne peut pas dire »
690	Helena B1	c'est pas ce qu'on dit non plus	Opposition à cette thèse B par Helena qui avait analysé l'article avec Manuella et est tenante de la thèse A de l'existence des végétaux pour Burki
691	Thomas B1	bah non	
692	Helena B1	on dit pas le vert c'est les végétaux	Refus d'une conception strictement fonctionnelle fondée sur la photosynthèse
693	Thomas B1	mais non mais non j'vous arrête pas à ça / non mais c'est vrai que la façon dont c'est mis ça donne envie	Envie de réduire les végétaux à une lignée monophylétique (Thèse B) (cf. Conception Phylogénétique Réduite CPR)
694	Valentino W1	c'est vrai que ça donne envie	
695	Thomas B1	parce que je sais que moi j'ai eu tendance à faire cette confusion mais en fait comme le terme de végétaux est pas explicité	Appel à la prudence, la nuance pour ne pas céder à thèse B réduisant les végétaux aux seuls Archaeplastida
696	Groupe 3	(discussion au sein du groupe pendant l'échange précédent)	
697	Benoît W3	je pense que ce que tu voulais dire c'est	Début de construction des raisons de la

		que d'un point de vue classement phylogénétique machin les végétaux ça ne peut pas exister scientifiquement parlant mais lui il sait qu'il y a des groupes qui qui	non-existence des végétaux en rappelant que c'est dans un contexte phylogénétique moderne Fin de l'explication incoplète et floue. Interprétation possible : mais Burki sait que les végétaux peuvent exister dans un autre registre que phylogénétique (par exemple fonctionnel)
698	Héloïse C3	il ne dit pas que ça n'existe pas il dit que le terme du coup ça ne peut pas exister vu leur	Utilisation du déictique « ça » sans expliciter de quoi il s'agit précisément Interprétation possible : « les végétaux existent dans un certain registre mais pas dans le registre phylogénétique »
699	Manuella B3	oui ça dépend / comment on formule euh	Basculement de Manuella qui reconnaît l'importance de la formulation du problème
700	Benoît W3	c'est ça que t'as voulu dire je pense	
701	Manuella B3	ben euh c'est les / c'est les organismes photosynthétiques / après]	Les végétaux existent et sont photosynthétiques (thèse A)
702	Professeur	donc je laisse le désaccord mais que certains ne veulent pas mettre végétaux qu'il n'y a rien et que d'autres pensent quand même que végétaux / même s'il n'est pas explicité dans la classification existe malgré tout au regard de l'auteur	
703	Benoît W3	en fait il a voulu le redéfinir donc en fait il part de ce que l'on appelait avant les végétaux et il sait que / euh comment dire / pour lui ça s'appelle plus les végétaux par ce que ce qu'on appelait végétaux avant c'était des groupes polyphylétiques / donc ça peut pas pour lui ça n'a pas de valeur scientifique / ça n'a pas de valeur de classification	Soutien de la thèse C de non-existence des végétaux pour Burki Raison : les végétaux au sens ancien sont maintenant polyphylétiques Loi de passage (implicite) : un groupe n'existe en phylogénie que s'il est monophylétique. Un groupe non monophylétique n'existe plus (c'est le cas des végétaux)
704	Professeur	d'accord	
705	Héloïse C3	c'est pour ça qu'il n'en parle pas / mais du coup ouais / j'suis assez d'accord	Soutien de la thèse C et de la raison présentée par Benoît
706	Thomas B1	et c'est un peu aussi la base de de sa méthode dans ce que dit Benoît quand il dit il part de ce qu'on sait avant / c'est vrai qu'il s'est beaucoup basé sur les classifications antérieures et ensuite il les a modifiées par rapport aux données phylo comme il dit phylogénomiques qu'il a	Mise en avant de l'importance de la méthode pour définir des groupes. On construit une phylogénie et on nomme définit ensuite les groupe => approche nominaliste (opposée à une approche essentialiste)
707	Professeur	d'accord / d'ailleurs petite parenthèse peut être est-ce que c'est lui qui les a vraiment modifié les classif en question / dans l'article est-ce qu'il a construit une classification vraiment ou est-ce que c'est une synthèse de / de travaux d'autres ou ? est-ce que la classification que vous avez sous les yeux	Passage à une nouvelle question : la nature de l'article de Burki (review). Est-ce « sa » classification ou une synthèse de nombreux travaux ?

11. Analyse des difficultés liées à la cladistique

11.1. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le premier débat collectif concernant Burki

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
826	Professeur	d'accord / OK / est-ce qu'on sait comment il les a traité derrière ces séquences / qu'est-ce que / qu'est-ce qu'il aurait pu utiliser comme méthode pour traiter ces séquences / c'est plus d'après vos connaissances / classiquement qu'est-ce qu'on en fait des séquences	Question ouverte sur les méthodes de phylogénie moléculaire
827	Laurène B2	on prend la moindre distance	Méthode phénétique
828	Professeur	est-ce que c'est la seule possibilité de grouper par distance ?	
829	Thomas B1	ou par ressemblance	Méthode phénétique
830	Valentino W1	méthode UPGMA	UPGMA : Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean. Méthode phénétique
831	Professeur	est-ce que vous vous rappeler des grandes méthodes qui permettent de traiter des données moléculaires ?	Questionnement visant à élargir aux autres méthodes
832-848	Discussion sur cladistique phénétique et méthodes probabilistes		
849	Professeur	pour en rester sur de la cladistique simple / qu'est-ce qu'on fait avec des données alignées sur lesquelles on a fait une hypothèse d'homologie primaire / ensuite qu'est-ce qu'on fait ?	Questionnement sur la cladistique
850	Héloïse C3	on déduit des pourcentages de similarité de	Réponse : phénétique
851	Professeur	ça c'est la [cladistique ?	
852	Valentino W1	ça c'est UPGMA]	UPGMA : méthode phénétique
853	Laurène B2	non / on / on code	
854	Professeur	(répondant à Héloïse) ça c'est de l'UPGMA mais si on veut faire de la cladistique	Nouvelle question sur la cladistique
855	Benoît W3	bah on les compare	Réponse très imprécise
856	Professeur	on code par rapport à un groupe externe	Le professeur donne un élément essentiel de la réponse attendue : la nécessité d'un groupe externe en cladistique
857	Héloïse C3	ah oui d'accord	
858	Professeur	on fait un codage / et qu'est-ce qu'il permet de voir ce codage ?	
859	Valentino W1	bah les modifications des diverses euh / enfin on compare avec euh	
860	Professeur	avec le groupe externe et qu'est-ce qu'on en dégage?	Le professeur rappelle l'utilisation d'un groupe externe pour en connaître le rôle
861	Laurène B2	l'état du caractère	La polarisation des caractères est enfin apportée par une étudiante
862	Professeur	l'état du caractère	
863	Thomas B1	l'état dérivé ou	
864	Professeur	états dérivés ou ancestraux / donc c'est un truc en plus c'est pas juste l'homologie primaire ensuite on code l'homologie primaire / si ici on utilise des méthodes probabilistes là je vous aide un peu dans la mesure où c'est dérivé des méthodes	Apport d'informations par l'enseignant sur la méthode utilisée

		cladistiques cela suppose qu'on ait impliqué quelque part la polarisation de caractères d'accord en plus d'utiliser tout bêtement l'homologie / donc l'idée de polarisation finalement même si elle ne vous est pas dite / mais dans les méthodes modernes elle est implicite	

11.2. Analyse des difficultés liées à la cladistique dans le second débat collectif concernant Whittaker et Cavalier-Smith

N°	Locuteur	Verbatim	Analyse
Article de Whittaker			
929	Professeur	oui darwinisme / s'il mobilise l'évolution a priori on peut imaginer que le darwinisme est mobilisé / d'accord / est-ce que vous voyez autre chose ? // n'hésitez pas / est-ce que vous voyez autre chose ?	Question sur les conditions de possibilités théoriques de la classification de Whittaker
930	Valentino W1	le début de la cladistique	Dans la frise chronologique distribuée, la cladistique est indiquée en 1965, 4 ans avant l'article de Whittaker
931	Professeur	pardon ?	Demande de confirmation
932	Valentino W1	le début de la cladistique	
933	Professeur	alors début de la cladistique	
934	Valentino W1	début très début	
935	Professeur	c'est quoi la cladistique ? je vous repose la question que je vous avais posée tout à l'heure / quelle est l'originalité de la méthode cladistique par rapport aux autres méthodes ?	Question de définition de la cladistique (discutée antérieurement)
936	Manuella B3	euh la polarisation	Réponse immédiate de Manuella sur la polarisation
937	Professeur	la polarisation / alors là est-ce qu'il y a polarisation ou est-ce qu'il y a pas ? non ou oui ?	
938	Héloïse C3	(chuchotant) non	
939	Aude C1	(chuchotant) bah absence de noyau présence de noyau	Confusion entre la polarisation et le codage présence / absence (mais formulée uniquement au sein de son groupe de travail)
940	Valentino W1	(répondant à Aude) est-ce que ça s'est polariser ?	Désaccord avec Aude
Article de Cavalier-Smith			
N°	**Locuteur**	**Verbatim**	**Analyse**
1010	Professeur	ouais ça reste le registre cellulaire / et alors lui par rapport à sa méthode quel regard vous portez dessus ?	
1011	Valentino W1	ah c'est phylogénétique	
1012	Valérie W2	on a mis phylogénie cladistique	Proposition d'une méthode cladistique alors que Cavalier-Smith appartient à un autre courant (Systématique évolutionniste), aujourd'hui éteint
1013	Professeur	phylogénie cladistique est-ce que vous êtes tous d'accord avec ça ? / est-ce que c'est phylogénétique est-ce que c'est cladistique ? [	
1014	Helena B1	(chuchotant) moi j'ai mis phénétique	Association de deux termes correspondant

		cladistique]	à des méthodes différentes
1015	Professeur	comment est-ce que vous positionnez par rapport à ça ? tu dis cladistique pourquoi ce serait cladistique	
1016	Evelyne C2	parce qu'il cherche justement à faire des liens de parenté et se servir de caractères homologues	Réduction de la cladistique à l'utilisation de l'homologie
1017	Professeur	alors il cherche à le faire est-ce qu'il le fait ? /	
1018	Thomas B1	(chuchotant) si je pense	
1019	Evelyne C2	oui / enfin ?	
1020	Professeur	est-ce que vous une méthodologie qui	
1021	Valentino W1	cladistique il y a un groupe externe dans son	Mise en relation de la cladistique en regard de l'utilisation de groupe externe
1022	Professeur	alors est-ce qu'il mentionne des groupes externes dans la construction de son de ses groupes ?	
1023	Valentino W1	c'était juste une question	Affirmation du rôle de tiers et non de proposant
1024	Héloïse C3	(chuchotant) j'crois pas	
1025	Aude C1	non	
1026	Professeur	est-ce qu'il mentionne / déjà en prenant le départ je repose la question cladistique ça part de quoi ? /	Question sur la définition de la cladistique (pour la 3e fois au moins)
1027	Laurène B2	hypothèse d'homologie primaire	Remobilisation rapide de la démarche hypothético-déductive donnant à l'homologie un statut d'hypothèse à examiner à l'issue de la construction phylogénétique
1028	Professeur	hypothèse d'homologie primaire alors ça est-ce qu'il passe ce cap ou pas ? est-ce que clairement il émet des hypothèses d'homologie primaire qu'il y a des arguments qui lui permettraient d'émettre des hypothèses ou pas dans votre	
1029	Thomas B1	il a la volonté de faire des groupes monophylétiques	
1030	Professeur	volonté	
1031	Valentino W1	c'est pareil que Whittaker	Comparaison à la démarche de Whittaker, point de comparaison permettant d'avancer
1032	Professeur	mais est-ce qu'il le fait ?	
1033	Thomas B1	non a priori non	
1034	Valentino W1	a priori non c'est ce qu'on avait tout à l'heure	
1035	Romina C2	lui il part du principe que si c'est cellulaire euh on a l'impression que c'est homologue	Rappel que Cavalier-Smith postule l'homologie sans chercher à le vérifier
1036	Professeur	d'accord	
1037	Romina C2	pour lui si c'est cellulaire c'est homologue	
1038	Aude C1	(chuchotant) il ne le dit pas / il dit pas tout ça	
1039	Professeur	d'accord ouais / si c'est cellulaire a priori c'est homologue donc peut-être que son hypothèse d'homologie à lui elle est là / pourquoi pas / cladistique ensuite qu'est-ce qu'on fait en cladistique ?	Questionnement pour avancer et examiner d'autres critères propres à la cladistique
1040	Aude C1	on polarise	Réponse rapide sur la polarisation

			montrant un effet positif des débats précédents
1041	Professeur	on polarise est-ce qu'il y a mention de polarisation quelque part dans son travail ?	
1042	Aude C1	non	Invalidation du recours à la polarisation
1043	Valentino W1	non je ne crois pas	
1044	Professeur	donc est-ce que je peux dire que c'est cladistique ?	
1045	Romina C2	non	Invalidation du caractère cladiste de la méthode de Cavalier-Smith
1046	Valentino W1	non	Accord
1047	Professeur	a priori non /est-ce que c'est phylogénétique [	
1048	Valentino W1	(chuchotant) phénétique]	Proposition d'une autre méthode : phénétique mais non reprise en collectif car chuchotée
1049	Professeur	si c'est pas polarisé ou pas ? (silence) faudrait peut-être s'entendre qu'est-ce qu'on entend par phylogénétique / ce serait quoi dans l'idée ?	
1050	Héloïse	des liens de parenté	
1051	Professeur	des liens de parenté / juste ça ? établir des liens de parenté	
1052	Thomas B1	(chuchotant)	
1053	Professeur	quel type de groupe on va figurer dans ce / dans une classification phylogénétique normalement ?	
1054	Valentino W1	mono	
1055	Héloïse	monophylétique	
1056	Professeur	monophylétique est-ce que / est-ce qu'il est sûr que tous les groupes qu'il a mobilisés sont monophylétiques	Question visant à creuser le caractère arbitraire de certains choix non examinés
1057	Aude C1	non non il est pas sûr	
1058	Valentino W1	non	
1059	Professeur	en tout cas qu'est-ce que vous me suggérez de mettre dans cette case là [en montrant la grille à remplir vidéoprojetée]	
1060	Valérie W2	volonté de	
1061	Valentino W1	volonté	
1062	Professeur	ouais volonté / la volonté est là	

12. Propositions des treize cartes conceptuelles relatives aux termes concernant l'évolution des idées

12.1. Propositions concernant les termes ou nœuds lexicaux theori/context/cadre

A2: methode theorie comme phenetique

A2: methode theorie comme methode probabiliste

A2: conception utilisant methode theorie

A2: methode theorie comme phylogenomique

A2: methode theorie comme cladistique

A7: contexte theorie soit gradisme

A7: theorie d endosymbiose soit secondaire

A7: contexte theorie soit evolutionisme darwinisme

A7: conception evolue selon contexte theorie

A7: contexte theorie soit cladistique

A7: cyanobacterie grace a theorie d endosymbiose

A7: theorie d endosymbiose soit primaire

A7: contexte theorie soit gradisme

A7: contexte theorie soit evolutionisme darwinisme

A7: conception evolue selon contexte theorie

A7: contexte theorie soit cladistique

A8: theorie de l evolution implique phylogenie

A8: apport theorie comme methode cladistique

A8: xixe siecle via theorie de l evolution

A8: apport theorie comme methode phenetique

A8: cavalier smith par le biais apport theorie

A8: apport theorie induit monophyletique

A8: whittaker par le biais apport theorie

A8: cavalier smith par le biais apport theorie

A8: apport theorie comme endosymbiose

B2: theorie d endosymbiose gradisme permettant d aboutir classification pseudo cladistique

B2: theorie d endosymbiose theorie de l evolution permettant d aboutir classification phylogenomique

B2: autotrophie photosynthese nutrition structure cellulaire moyen technique theorie microscopie

B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie theorie d endosymbiose theorie de l evolution

B2: autotrophie photosynthese nutrition structure cellulaire moyen technique theorie gradisme

B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie bioinformatique pcr sequencage

B2: chlorophylle photosynthese structure flagellaire crete mitochondriale moyen technique theorie theorie d endosymbiose gradisme

B2: chlorophylle photosynthese structure flagellaire crete mitochondriale moyen technique theorie microscopie electronique

B3: avancee theorie ???? endosymbiose

B3: concept de vegetal evolution des idees passe par theorie

B3: concept de vegetal evolution des idees est influencee par avancee theorie

B3: avancee theorie ???? theorie cellulaire

B3: societe selon contexte

B3: contexte religion fixiste

B3: contexte penseur philosophique

B5: avancee idee en theorie cellulaire

B6: phylogenetique permis par theorie de l evolution

B6: phylogenetique permis par theorie cellulaire

B6: fonctionnelle ecologique permis par theorie de l evolution

B6: fonctionnelle ecologique permis par theorie cellulaire

B6: phylogenomique permis par theorie de l evolution

B7: cadre de pensee peut etre evolutionisme

B7: pluralite classification depend cadre de pensee

B7: cadre de pensee peut etre fixiste

B8: theorie de l evolution avancee scientifique whittaker copeland haeckel

12.2. Propositions concernant les différentes méthodes de classification

Mot : homolog/apomorph

A4: hennig 1965 basee sur homologie hypothese

A6: classification cavalier smith 1981 chromista biliphyta viridiplantae basee sur homologie implicite

A8: methode cladistique se base sur homologie

B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie theorie d endosymbiose theorie de l evolution

B2: homologie moleculaire position de caractere moyen technique theorie bioinformatique pcr sequencage

B2: archaeplastidae sar caracterise par homologie moleculaire position de caractere

B5: crete mitochondriale synapomorphie plaste

B5: monophyletique synapomorphie plaste

Mot : monophyletique

A8: apport technique induit monophyletique

A8: apport theorie induit monophyletique

B5: monophyletique synapomorphie plaste

B5: eucaryote compose monophyletique

B6: cavalier smith en faisant monophyletique

B6: monophyletique nombre regne 7 ou 9 regne

B7: cavalier smith creer monophyletique

B7: 2 regne creer monophyletique

B7: whittaker creer monophyletique

B8: burki archaeplastidae caracteristique monophyletique

Mot : polyphyletique

A2: pcr obtient polyphyletique

A4: phylogenetique ou les vegetal sont polyphyletique

A7: polyphyletique en utilisant methode probabiliste

A7: burki 2014 definit polyphyletique

A8: methode probabiliste traduisant polyphyletique

A8: phylogenomique traduisant polyphyletique

B4: vegetal est polyphyletique

B5: polyphyletique dont autre

B5: absorption compose polyphyletique
B5: polyphyletique modifie concept de vegetal
B5: polyphyletique dont plantae
B5: eucaryote compose polyphyletique
B6: grande ligne evolutive en faisant polyphyletique
B7: burki creer polyphyletique
B8: sabine et gasparini caracteristique polyphyletique
B8: classification 2 regne caracteristique polyphyletique
B8: whittaker copeland haeckel caracteristique polyphyletique

---

Mot : paraphyletique

A3: algue constituant groupe paraphyletique
A3: classification groupe paraphyletique
A7: cavalier smith 1981 definit paraphyletique

Mot : cladistique

A2: methode theorie comme cladistique
A4: phylogenetique utilise cladistique
A4: cladistique selon hennig 1965
A7: cladistique utilise par burki 2014
A7: cladistique utilise par cavalier smith 1981
A7: contexte theorie soit cladistique
A8: apport theorie comme methode cladistique
A8: methode cladistique se base sur homologie
A8: methode cladistique se base sur homoplasie
B2: theorie d endosymbiose gradisme permettant d aboutir classification pseudo cladistique
B2: microscopie electronique permettant d aboutir classification pseudo cladistique
B8: cladistique avancee scientifique cavalier smith

Mot : phenetique

A2: methode theorie comme phenetique
A4: phenetique basee sur alignement de sequence
A4: phylogenetique utilise phenetique
A7: phenetique prend en compte procaryote
A7: phenetique prend en compte eucaryote
A7: pcr sequencage origine phenetique

A8: apport theorie comme methode phenetique

Mot : probabiliste

A2: methode theorie comme methode probabiliste

A4: phylogenetique utilise methode probabiliste

A4: methode probabiliste basee sur alignement de sequence

A4: methode probabiliste basee sur methode probabiliste

A6: classification burki 2014 basee sur methode probabiliste

A7: polyphyletique en utilisant methode probabiliste

A8: methode probabiliste traduisant polyphyletique

A8: burki grace a methode probabiliste

B6: phylogenomique permis par methode probabiliste

13. Transcription des échanges relatifs à la construction de la carte conceptuelle (groupe A7)

[ ] : chevauchements entre deux tours de parole ; ( ) : indication non verbale, par exemple des concepts discutés sur la carte conceptuelle

1	Manuella	végétaux (comme premier concept de la carte)
2	Helena	juste végétaux ?
3	Manuella	concept des végétaux
4	Helena	voilà voilà
5	Manuella	est-ce qu'on met en commun nos
6	Helena	ouais
7	Manuella	alors / moi c'est un peu éparpillé
8	Helena	moi aussi / tu veux qu'on les mette [direct dessus
9	Manuella	directement] et après
10	Helena	on essaye de
11	Manuella	de les ranger un peu de les classer
12	Helena	comme ça on voit si on a des trucs en commun / alors vas y dis-moi
13	Manuella	euh bah / tout ce qui est organisation / donc organisation peut être
14	Helena	organisation / ensuite
15	Manuella	racine tige feuilles
16	Helena	photosynthèse / du coup avec ça moi j'ai mis plastes pigments
17	Manuella	pigments
18	Helena	on va avoir plein de trucs
19	Manuella	euh vie fixée
20	Helena	vie fixée
21	Manuella	après on a groupe polyphylétique // classification
22	Helena	donc là on a phylogénie
23	Manuella	ouais
24	Helena	j'ai mis gradisme aussi
25	Manuella	fixisme
26	Helena	bah là il n'y en a pas
27	Manuella	y' en a pas vraiment
28	Helena	dans les conceptions qu'on a vus euh
29	Manuella	ouais c'était du gradisme / ouais on va parler plutôt du gradisme
30	Helena	il y a quand même l'idée d'évolution dans toutes les conceptions qu'on a vu
31	Manuella	probabilisme // le terme évolution / est-ce qu'on dit évolutionnisme darwinisme
32	Helena	bah du coup évolution ça
33	Manuella	oui / on n'a pas parlé du darwinisme hein ? / phénétique cladistique
34	Helena	phénétique cladistique
35	Manuella	autotrophie
36	Helena	autotrophie
37	Manuella	endosymbiose
38	Helena	j'ai mis différentes techniques
39	Manuella	ouais / PCR séquençage
40	Helena	oui / je vais mettre technique avec un s / donc est-ce que je mets PCR et séquençage en même temps (dans un même nœud)
41	Manuella	ouais / trois petits points
42	Helena	comme ça trois petits points
43	Manuella	euh j'ai mis morphologie anatomie moléculaire pour les différentes classifications mais vas y vas y (au sens de "termine d'écrire" ce que tu tapes)
44	Helena	j'ai mis microscopie
45	Manuella	ouais
46	Helena	microscopie / on a électronique / optique / vas y dis-moi
47	Manuella	euh / classification morphologique / anatomique / moléculaire
48	Helena	moi j'ai mis fonctionnelle aussi
49	Manuella	ouais fonctionnelle
50	Helena	tu m'as dit ?

51	Manuella	fonctionnelle
52	Helena	fonctionnelle
53	Manuella	morphologie morpho-anatomie
54	Helena	morpho-anatomique
55	Manuella	moléculaire
56	Helena	moléculaire // est-ce que j'ai mis autre chose ?
57	Manuella	après oui règne famille espèce
58	Helena	oui voilà / règne / super-groupe / donc après il y a espèce / est-ce que l'espèce c'est un groupe ?
59	Manuella	non non non (onomatopée ressemblant à un "non")
60	Helena	on va mettre groupe aussi
61	Manuella	diversité
62	Helena	oui
63	Manuella	j'sais pas après j'mets ça comme ça
64	Helena	si si si // moi j'ai mis eucaryotes procaryotes
65	Manuella	ouais / unicellulaire pluricellulaire
66	Helena	j'ai mis polycellulaire (rire)/ procaryotes / donc pluricellulaires / unicellulaires
67	Manuella	cyanobactéries
68	Helena	oui
69	Helena	cyanobactéries
70	Manuella	j'sais pas si on met mitochondries / parce que c'est tous les êtres vivants
71	Helena	ouais non
72	Manuella	vie fixée on l'a mis ?
73	Helena	dans les trucs j'ai mis
74	Manuella	CO2 O2 peut être ?
75	Helena	ouais si tu veux / tant pis ça sera comme ça (probablement le "2" non mis en indice à CO2) / O2 / attends je vais le mettre par là (vers phylogénie / classification / gradisme...) mais il y a cladistique
76	Manuella	on l'a pas mis encore ?
77	Helena	il y a phylogénie phénétique
78	Manuella	on l'a mis cladistique / là
79	Helena	ah oui / bah tu vois j'avais déjà oublié
80	Manuella	euh arbre phylogénétique
81	Helena	euh ouais / bah en fait on a phylogénie
82	Manuella	on va voir comment on formulera nos phrases
83	Helena	je vais le mettre (arbre phylogénétique)
84	Manuella	est-ce qu'on met des noms ?
85	Helena	Whittaker Cavalier-Smith Burki
86	Manuella	euh ouais / et même Linné
87	Helena	Whittaker / je mettrai une majuscule plus tard / c'est avec un i / Cavalier-Smith
88	Manuella	on pourrait parler de leur utilité / mais du coup c'est pas scientifique / par exemple biocarburants / alimentaire
89	Helena	bah c'est dans les fonctions / dans fonctionnelle on va avoir euh / biocarburants / alimentation / qu'est-ce que tu voyais d'autre ?
90	Manuella	bah je sais pas si dans le textile / c'est pas textile ce serait
91	Helena	usages
92	Manuella	habitation enfin
93	Helena	sinon je mets usages quotidiens / comme ça ça regroupe un peu tout
94	Manuella	oui
95	Helena	euh / OK
96	(2e étape regroupement des mots par thème)	
97	Manuella	voilà est-ce qu'on essaie de ranger du coup un petit peu
98	Helena	ouais / on va essayer de / parce que là
99	Manuella	là on va mettre / euh / la photosynthèse
100	Helena	alors
101	Manuella	on fait ça ou on essaie de trouver des liens / ou on mettra des termes de lien après en fonction de ce qu'on a / regroupé
102	Helena	en fonction de / je crois / ouais

103	Manuella	alors soit
104	Helena	alors est-ce qu'on part de chaque conception / parce que quand même
105	Manuella	en tant que groupe biologique (en se référant à la consigne de réalisation de la cmap)
106	Helena	et comment ils conçoivent les végétaux / est-ce que euh
107	Manuella	déjà mettre tout ce qui est PCR séquençage microscopie électronique optique / ça c'est sûr que c'est ensemble c'est technique
108	Helena	ouais donc euh
109	Manuella	comment le concept des végétaux a évolué / c'est grâce aux différentes techniques qui ont évolué
110	Helena	il y a ça (en déplaçant cladistique à côté de phénétique) / probabilisme ça va être un peu là aussi
111	Manuella	on n'a qu'à mettre aussi conception / après je sais pas genre évolution des conceptions / je sais pas
112	Helena	sinon on part de concept des végétaux / et par exemple on part de Whittaker euh / Whittaker il pensait tel tel truc / machin il pensait tel tel truc
113	Manuella	henhen (au sens de oui) bah / tu crois ?
114	Helena	je je sais pas
115	Manuella	parce que du coup on remet où photosynthèse / ça va être partout tu vois
116	Helena	ça (en déplaçant groupe polyphylétique) ça va avec la phylogénie
117	Manuella	ouais
118	Helena	ça (gradisme) je le sépare / ça ne se déplace pas (problème de sélection du nœud) / ça (vie fixée) ça va dans une définition en fait
119	Manuella	voilà c'est bien définition / photosynthèse pigments bah c'est ça plastes
120	Helena	plastes autotrophie
121	Manuella	ouais
122	Helena	bah du coup en fait ça va aller avec plastes (en parlant du concept "endosymbiose")
123	Manuella	ouais plastes / et cyanobactéries du coup avec l'endosymbiose
124	Helena	ouais / je vais le mettre là
125	Manuella	oui tu te mets à droite
126	Helena	organisation / tu veux que je le mette avec (en cliquant sur racine tige feuille)
127	Manuella	voilà c'est ça on va dire / bah du coup procaryotes et pluricellulaires eucaryotes et pluricellulaires parce que cela dépend aussi de ça / leur organisation
128	Helena	ouais / alors donc dans la définition // tout est dans la définition / en fait les définitions vont changer en fonction de / de la conception
129	Manuella	on n'a pas parlé des thalles
130	Helena	ah oui mais du coup c'est dans
131	Manuella	c'est dans l'organisation
132	Helena	en fait ça (en cliquant sur racine) je ne sais pas si on va l'utiliser
133	Manuella	henhen (au sens de oui)
134	Helena	parce que ça c'est que les angiospermes
135	Manuella	oui mais après il y a les thalles / il y a quoi d'autres ? / l'organisation est différente en fonction de si c'est un organisme unicellulaire ou pluricellulaire / dans le cas des pluricellulaires il peut y avoir différents / types d'organisation comme racine tige feuille ou thalle donc on pourrait rajouter thalle
136	Helena	alors ça du coup comme ça (en déplaçant pluricellulaires vers organisation racine tige feuille) // thalle / donc ça c'est des gens (en parlant des quatre noms d'auteurs regroupés à gauche)/ ça c'est à mettre avec les arbres (en déplaçant les termes règne et super-groupe, espèce et groupe) / OK // donc ça (moléculaire) ce serait plutôt avec les techniques de classification (en rapprochant des termes classification, cladistique phénétique, probabilisme) // dans fonctionnelle il y aurait biocarburants usages quotidiens et alimentation
137	Manuella	est-ce qu'on mettrait contexte pour tout ce qui est gradisme / euh je sais pas
138	Helena	oui / gradisme / on peut mettre évolutionnisme / euh // comme ça (en ajoutant darwinisme après évolutionnisme dans le même nœud)
139	Manuella	contexte
140	Helena	contexte de pensée
141	Manuella	avec un s à la fin / voilà et donc dans les classifications ça donne fonctionnelle
142	Helena	y'en a une qui fonctionnelle
143	Manuella	morpho / moléculaire
144	Helena	voilà

145	Manuella	et utilitaire / on n'a pas utilitaire / c'est tout ce qui est biocarburants
146	Helena	ah ça c'est fonctionnelle
147	Manuella	fonctionnelle c'est
148	Helena	c'est plutôt euh / les fonctions d'accord / donc utilitaire
149	Manuella	fonctionnelle on met quoi dedans ? c'est tout le reste ou ?
150	Helena	fonctionnelle on aurait / euh // productivité primaire
151	Manuella	ouais voilà
152	Helena	productivité primaire qu'est-ce qu'on aurait d'autre
153	Manuella	écologique
154	Helena	ouais du coup // est-ce que / fonctionnelle / je vais mettre un s / ça je ne sais pas où on va le mettre encore
155	Manuella	OK / alors / revenons du coup en haut / qu'est-ce qu'on mettrait du coup juste en dessous de concept des végétaux
156	Helena	déjà si on parle de ça (organisation)
157	Manuella	déjà définis / on peut être définis / un végétal
158	Helena	mais justement la définition elle change en fonction des conceptions / mouais
159	Manuella	alors bah c'est ça / euh / définition / là on met concept des végétaux ou juste végétaux
160	Helena	euh
161	Manuella	défini en fonction de / des concepts / des conceptions du coup / végétaux
162	Helena	on peut mettre / définis / si on peut mettre conceptions / et donc on le mettrait là (juste sous "concept des végétaux") / du coup (relie concept des végétaux à conceptions) / et là tu mettrais définis (comme connecteur) / ou tu veux mais dans l'autre sens / ou sinon on met (au lieu de " concept des végétaux")
163	Manuella	végétaux
164	Helena	on met euh / végétal
165	Manuella	ouais
166	Helena	non (ayant une difficulté pour modifier le connecteur)
167	Manuella	on recommence
168	Helena	c'est parce qu'il ne veut pas me la mettre (la flèche de lien) / en dessous
169	Manuella	c'est parce que la case n'est pas tout à fait / juste en dessous
170	Helena	bon c'est pas grave
171	Manuella	(végétal) est défini / par
172	Helena	est défini selon
173	Manuella	ouais / voilà c'est bon plutôt / euh (hésitation en même temps qu'Helena, petit rire) / est défini selon les conceptions / regarde ce que l'on peut mettre encore / si on doit mettre différentes choses autour / après
174	Helena	on peut mettre sont classés selon / machin
175	Manuella	ouais ouais ouais / très bien / ah mince (parlant de la police de caractères trop grosse)
176	Helena	ah oui d'accord
177	Manuella	alors sont classés
178	Helena	selon / des classifications (rire)
179	Manuella	euh sont classés euh / dans euh / différentes classifications / non c'est ça / c'est encore / sont regroupés / ah non ça c'est / cette classification on en reparlera avec les autres / tu vois ?
180	Helena	non sinon / on a les conceptions / qui permettent de classer
181	Manuella	ouais / est défini selon les conceptions
182	Helena	est défini selon
183	Manuella	les conceptions
184	Helena	sinon on met les conceptions après c'est pas grave / on est est défini selon les conceptions / on met les différentes / non ça va faire répétition à chaque fois
185	Manuella	ouais / euh / c'est dur hein
186	Helena	oui
187	Manuella	du coup c'est des classifications qui sont fonctionnelle utilitaire / c'est les classifications utilitaires ?
188	Helena	ouais
189	Manuella	ouais c'est ça du coup / sont classés / on peut mettre classifications en haut / un peu plus loin / et là / qu'est-ce qu'on pourrait mettre ? (comme connecteur entre végétal et classification) / ah mais qu'est-ce qu'il euh (difficulté pour mettre un connecteur, créé un nœud au lieu d'écrire le connecteur)

190	Helena	euh / est-ce que // on n'a pas mis de flèches (il n'y a pas de flèche visible au bout du trait qui relie "est défini selon" et "conceptions") // euh / sinon est-ce qu'on part pas / est-ce que ça (est défini selon) ça serait pas à la fin ? / à la fin on établit ouais mais non / du coup il y a plusieurs définitions
191	Manuella	ouais / moi je mettrai végétaux et pas végétal je sais pas ça me gêne
192	Helena	d'accord
193	Manuella	végétaux / sont classés dans / mais après / classification ? / ouais voilà c'est ça
194	Helena	sont classés / dans tu m'as dit
195	Manuella	du coup là on mettrait classification
196	Helena	oh (difficulté avec le connecteur)
197	Manuella	faut que tu fasses la flèche et que tu enlèves ça / tu rapproches trop / parce qu'après c'est trop petit pour écrire (le connecteur entre deux concepts) // tu as mieux un e en trop (à classés)
198	Helena	euh
199	Manuella	classifications
200	Helena	après
201	Manuella	peuvent être
202	Helena	je vais mettre mes trucs (en pointant cladistique et autres méthodes)
203	Manuella	ouais / donc morpho- anatomique / fonctionnelle / utilitaire / du coup fonctionnelle on a dit que c'est pas utilitaire (fin de la phrase rapide / peu audible)
204	Helena	écologique
205	Manuella	ça on a dit que c'est plutôt après / utilitaire
206	Helena	ouais attends / utilitaire / on va mettre comme ça (en déplaçant "classification" vers la gauche pour avoir de la place)
207	Manuella	on le met complètement sur le côté (morpho-anatomique) / voilà / fonctionnelle / utilitaire / et moléculaire
208	Helena	moléculaire ? / classification moléculaire c'est bizarre
209	Manuella	parce qu'on a vu avec Burki / il disait que avant on faisait que des classifications morpho-anatomique
210	Helena	ça c'est l'évolution des techniques mais / la classification en elle-même / est-ce qu'elle est
211	Manuella	génétique
212	Helena	mouais / pourquoi il ne fait des trucs lui (en parlant de la police trop grosse) / ah j'ai rien touché (la fenêtre du logiciel disparaît dans le coin actif de l'ordinateur)
213	Manuella	ça c'est chaud !
214	Helena	on n'a rien touché
215	Manuella	il s'est sauvé (en riant et en s'adressant aux voisins)
216	Valentino [voisin]	à gauche tu as le menu / si tu cliques là dessus ça fait quoi ?
217	Helena	et en bas / y a rien qui s'affiche
218	Valentino	ah voilà / touchez plus à rien (retour de la fenêtre du logiciel)
219	Helena	ah d'accord / donc bref
220	Manuella	on le refera après / bon bref génétique
221	Helena	génétiques
222	Manuella	ah c'est vrai que c'est gros / génétiques
223	Helena	du coup qui sont de plusieurs types après / tu vois les génétiques elle peut être euh / ouais
224	Manuella	bah sinon euh / sinon on essaie de relier
225	Helena	parce que là phylogénie / on peut mettre ça et ça (en pointant génétiques et morpho-anatomiques)
226	Manuella	du coup ça serait peut-être plus phylogénétiques fonctionnelles et utilitaires
227	Helena	ouais / et du coup on mettrait
228	Manuella	ou c'est chiant / mets plutôt fonctionnelles et utilitaires d'un côté parce qu'on fera peut être des liens avec morpho génétique / parce tu sais c'est en fonction des évolutions on a commencé par morpho-anatomique
229	Helena	là on va mettre phylogénétique (au lieu de phylogénie) / phylogénétique / et tout ça ça serait dans la phylogénétique
230	Manuella	henhen
231	Helena	et donc tu veux que je mette où ? / parce que du coup si je suis comme ça si je les mets sur le même plan (phylogénétiques fonctionnelles utilitaires)
232	Manuella	non c'est pas là

233	Helena	c'est où ? / ce serait plutôt / parce qu'on peut faire un lien
234	Helena	phylogénétique il n'y aura pas de lien avec fonctionnelles et utilitaires / ah (difficulté pour sélectionner le nœud)
235	Manuella	c'est pas ça que je veux dire / ça (fonctionnelles et utilitaires) on les met sur le côté parce de toute va manière qu'on va discuter trente minutes là-dessus / mais ceux là (phylogénétiques) on les met un petit peu plus par ici / parce que peut-être qu'avec d'autres qu'on dira / euh par exemple je sais plus lesquels Cavalier-Smith c'était surtout morpho-anatomique par exemple je sais pas / tu vois ce que veut dire
236	Helena	bah oui mais Whittaker c'était purement fonctionnel hein / parce que c'était la nutrition
237	Manuella	ouais / à moins que / [utilitaires
238	Helena	utilitaires] on peut le mettre sur le côté / fonctionnelles t'as qu'à le mettre voilà [entre utilitaires et phylogénétique]
239	Manuella	c'est vrai qu'on va pas avoir beaucoup de place / on va mettre ça là / euh
240	Helena	on bougera selon les besoins
241	Manuella	ah (problème de sélection d'un concept) / alors qu'on le mette / tu crois qu'on le met au même degré mais du coup il faudra / ça va faire / je sais pas / tac tac tac trois flèches (à partir de classifications) / fonctionnelles productivité primaire écologique on va dire / et ensuite de ce côté là on aurait fini entre guillemets et après on va faire le lien / donc les conceptions / ont évolué grâce / aux techniques / au contexte de pensée
242	Helena	et sinon dans phylogénie on peut faire une suite c'est-à-dire qu'on obtient différents arbres / on obtient euh différents arbres
243	Manuella	donc génétiques et morpho-anatomiques / qui donnent
244	Helena	différents arbres
245	Manuella	ouais donc là on mettrait des s / s du coup
246	Helena	donc qui donnent différents arbres / euh / après monophylétique on l'a mis quelque part
247	Manuella	attends / utilitaires / c'est là du coup / ça va être serré (regroupe "usages quotidiens" "alimentation" "biocarburants" avec "utilitaires") / on va voir on va voir
248	Helena	on va faire un truc groupe monophylétique aussi
249	Manuella	ça écrit ?
250	Helena	oui ça écrit / monophylétique
251	Manuella	du coup avec un s
252	Helena	oui
253	Manuella	oui / en bas / alors alors alors / ça (organisation) définit ou décrit avec différentes organisations / racines ou thalle ou / décrit en fonction unicellulaires pluricellulaires
254	Helena	oh (la fenêtre disparaît à cause de la fonction "coin actif" du mac) / c'est peut-être parce qu'on appuie là
255	Manuella	non j'ai l'impression qu'on doit faire un geste / vers le haut ou vers le bas
256	Helena	oui
257	Manuella	ah c'est pas là ? / qu'est-ce que c'est que ça ? / ah (rire car la fenêtre du logiciel revient) / c'est impressionnant / attends je vais essayer de dézoomer / comment on fait
258	Helena	ouais comme ça
259	Manuella	alors attends
260	Helena	est-ce qu'on ne rapprocherait pas le (rire)
261	Manuella	oui déjà / j'y ai pensé un moment
262	Helena	ah non il faut pas qu'on se le rapproche en fait
263	Manuella	c'est quoi ça ?
264	Helena	je ne sais pas / attends c'est parce que c'est serré derrière je crois qu'on peut / voilà
265	Chercheur	pas trop dur ?
266	Helena	si un peu
267	Manuella	c'est un peu dur d'organiser toutes ces idées mais bon on va y arriver / alors tu vois on peut organisation on peut / décrire // tu vois macro / de manière comme ça visuelle / ah mais non
268	Helena	observation ouais mais non
269	Manuella	les décrire / ouais mais décrire organisation ouais
270	Helena	euh non / organisés (rire)
271	Manuella	organisés / après ça ferait en fonction de s'ils sont unicellulaires ou pluricellulaires / pluricellulaire on mettrait racine tige feuille et euh / thalle
272	Helena	sinon on enlève organisation / et là on met organisés (sur le connecteur)
273	Manuella	voilà / voilà / pourquoi pas
274	Helena	organisés

275	Manuella	avec un s / tu déplaces plutôt celle-là
276	Helena	non sinon il ne va pas me mettre la flèche
277	Manuella	d'accord
278	Helena	en fait il / tu vois il ne déplace morceau de flèches
279	Manuella	d'accord
280	Helena	c'est trop chiant / ah peut-être que je peux faire comme ça / à la place d'organisation mettrait
281	Manuella	organisés euh
282	Helena	en différents
283	Manuella	j'ai envie de mettre en fonction / unicellulaires ou pluricellulaires / en fonction de / comment / un terme qui regrouperait uni et pluri ? / organisés euh
284	Helena	sinon euh / composés euh de cellules /ah non c'était des pluricellulaires et machin / euh
285	Manuella	composé d'une cellule ou de plusieurs cellules
286	Helena	ah voilà
287	Manuella	du coup on mettrait deux flèches / non qu'est-ce qu'il / ah voilà (problème de connecteur) / composés
288	Helena	composés
289	Manuella	du coup là une cellule
290	Helena	une cellule
291	Manuella	et une autre flèche du coup à partir de composés / plusieurs (rire sur le mot "plusieurs" prononcé avec un accent) / on peut mettre /
292	Helena	comme ça (entre parenthèses après une cellule)
293	Manuella	unicellulaire voilà parfait
294	Helena	cellulaires // pluricellulaires / ça donc / si t'es pluricellulaire / ah non c'était euh / il ne m'a pas mis de flèche
295	Manuella	oui il te l'a mis mais c'est bizarre c'est quand t'as bougé la truc / ah tu vois elle se cache (la pointe de la flèche n'est plus visible selon la place de la case du concept)
296	Helena	(rire)
297	Manuella	il faudrait que tu mettes un petit peu plus sur la gauche sinon / je sais pas ah non / ah c'est trop bizarre
298	Helena	bon on va laisser comme ça
299	Manuella	alors pluricellulaire avec tout ce qui est racine feuille thalle / qu'est-ce qu'on pourrait mettre ?
300	Helena	donc là il faut mettre d'autres flèches / ouais mais je les mets là ?
301	Manuella	c'est un corpus (confusion avec cormus) /c'est avec racine et truc
302	Helena	donc je peux mettre hein / corpus / alors attends
303	Manuella	enlève tout / faut d'abord penser aux liens / donc pluricellulaires sont composés / végétaux composés d'une cellule ou de plusieurs cellules organisé en corpus ou en thalle
304	Helena	pourquoi tu vois quand je mets ma flèche il me fait ça il est chiant lui (difficulté avec le connecteur) // bon organisés
305	Manuella	organisé en / corpus
306	Helena	cormus plutôt
307	Manuella	cormus ouais cormus
308	Helena	est-ce que je peux mettre entre parenthèses racine tiges feuilles
309	Manuella	ouais / il y a plusieurs racines
310	Helena	plusieurs tiges
311	Manuella	ouais
312	Helena	donc ça
313	Manuella	je vais le mettre en dessous / je baisse
314	Helena	le truc c'est que ça ça me gêne (la fenêtre Styles) / parce que le truc c'est qu'on va mettre de trucs en dessous alors / et du coup je refais une flèche / thalle
315	Manuella	oui / déjà c'est bien (satisfaction d'avoir résolue cette partie de la carte)
316	Helena	voilà / donc [ça je vais l'enlever
317	Manuella	et maintenant / concept]
318	Helena	oui racine je l'enlève / OK
319	Manuella	ouais / euh
320	Helena	mais du coup tu vois / unicellulaire le problème c'est que / pas dans toutes les conceptions
321	Manuella	ouais
322	Helena	dans les/dans les premières conceptions il n'y a pas unicellulaires / c'est ça le problème
323	Manuella	donc là on parle que / que des conceptions

324	Helena	bah il faut / il faut
325	Manuella	conceptions des végétaux / ouais mais dans les conceptions on parle bien quand même d'unicellulaires / ça arrive
326	Helena	oui mais le truc c'est que / si on le met là faudrait ouais / qu'on le mette comme ça / qu'on puisse faire des liens après / avec nos différentes conceptions (en montrant les différents auteurs)
327	Manuella	on verra
328	Helena	tu vois ça c'est pareil c'est pas dans toutes les conceptions vie fixée
329	Manuella	mais tout n'est pas dans les différentes [conceptions
330	Helena	bah c'est ça et je sais pas comment]
331	Manuella	donc on met plus rien alors
332	Helena	ah non je ne dis pas qu'on ne les met pas [je dis que
333	Manuella	on va] d'abord faire les différentes conceptions et après on verra si on va mettre des liens / si on connaît des liens entre les différentes choses
334	Helena	d'accord
335	Manuella	tu veux mettre quoi ?
336	Helena	une autre flèche / bah / ah oui c'est là oui pardon
337	Manuella	conceptions
338	Helena	sont définies selon donc
339	Manuella	qui évoluent / euh si on dit
340	Helena	tu veux mettre une flèche / genre qui évoluent
341	Manuella	qui ont évolué / ouais / évoluent
342	Helena	euh qui évoluent euh / selon on peut mettre les techniques après
343	Manuella	ouais / il y a les techniques / les contextes de pensée
344	Helena	ouais / techniques / contextes de pensée
345	Manuella	tu peux enlever celui-là et celui-là (doublons)
346	Helena	ah contextes oui j'ai mis concepts / euh
347	Manuella	et techniques en haut
348	Helena	je vais mettre plutôt oui contextes / contextes [de pensée
349	Manuella	de pensée] / euh ouais contextes pensée
350	Helena	et du coup / je vais le mettre par là parce qu'on va rajouter des trucs / techniques / on peut mettre techniques et la on va mettre tout ce qui est PCR
351	Manuella	ouais alors attend / c'est vrai que c'est trop chiant ce truc (fenêtre Styles) mets le tout en bas / voilà tu peux encore plus le baisser si tu veux / euh déjà là on a pas du tout fait de flèche / on va peut-être le faire maintenant comme ça
352	Helena	classifications peuvent être
353	Manuella	ouais peuvent être ouais
354	Helena	peuvent être donc / euh je mène flèche qui va là (utilitaires)
355	Manuella	ouais
356	Helena	une flèche qui va là (phylogénétiques) / ça je vais l'enlever (case vide avec ???)
357	Manuella	(propos peu audible mais sans importance)
358	Helena	et fonctionnelles
359	Manuella	ouais
360	Helena	fonctionnelles
361	Manuella	ça c'est marrant / tu le prends (flèche) et voilà
362	Helena	euh
363	Manuella	pas forcément on va pas forcément mettre ça / phylogénétiques / soit j'en sais rien / phylogénétiques / du coup on peut faire qu'une seule flèche alors / c'est pour ça en fait / on va enlever celle-là
364	Helena	je vais baisser celle-là
365	Manuella	ouais / donc soit /
366	Helena	pourquoi il en met pas là
367	Manuella	on verra après on lui demandera (au chercheur) / pourquoi il y a des flèches dès fois non / tout à l'heure ils ont demandé (le binôme voisin)
368	Helena	alors fonctionnelles / utilitaires
369	Manuella	c'est trop serré / il y a tout ça comme place mais c'est trop serré
370	Helena	ouais mais du coup / après je pense qu'on va avoir besoin de place non ?
371	Manuella	mais j'ai l'impression qu'on en a quand même vachement (elle déplace des mots vers le bas

		pour dégager de la place en haut et desserre la carte vers le premier concept)
372	Helena	pour l'instant on va le mettre comme ça / on verra après ce qu'on en fait
373	Manuella	je pense qu'on refera tout après / il faudra faire plus gros plus visible / on fera tout ça après c'est bon
374	Helena	comme ça j'ai fais de la place pour ce côté-là
375	Manuella	ouais
376	Helena	donc phylogénétiques / qui peuvent être soit (déplace morpho-anatomiques et génétiques)
377	Manuella	ouais c'est bien de le relier / de le mettre proche de ça parce que de toute manière / euh
378	Helena	ah mais du coup c'est pas plutôt on mettrait pas plutôt phénétique ou cladistique
379	Manuella	ça c'est méthodes
380	Helena	ouais / ouais tu vois les phylogénétiques / phylogénétiques c'est pas / euh / ouais (passage aux termes liés à fonctionnelles) / bon il ne met pas les flèches c'est pas grave / euh exemple [comme connecteur entre fonctionnelle et productivité primaire]/ c'est quoi ça (problème de connecteur) / toujours pas assez de place
381	Manuella	peuvent être tu le déplaces un peu par là (un peu à droite)
382	Helena	du coup ouais / on fait ça / il nous enlève les flèches c'est pas grave // voilà / donc je mets exemple aussi (entre "utilitaires" et "usages quotidiens")
383	Manuella	ouais / monte un petit peu exemple en haut
384	Helena	ensuite tout ça (le paquet de concepts non reliés à droite)
385	Manuella	il y a écologique / avec fonctionnelles / du coup avec un s (à"exemple") / ah bah exemple écologique c'est bon
386	Helena	oui mais c'est plusieurs exemples / de fonctionnelles
387	Manuella	ouais
388	Helena	euh / OK / donc / cladistique et phénétique / tu les mettrais où toi ?
389	Manuella	euh bah / peut-être tu vois avec ce qu'on a vu / j'ai peut être le truc qu'on a vu avec lui (la grille d'analyse des articles remplie lors de la séance précédente) / est-ce que je vais le prendre ? tu sais le grand tableau
390	Helena	ouais (pendant que Manuella cherche dans ses affaires Héloïse déplace des mots et les regroup)
391	Manuella	on n'a pas tu sais le grand truc il nous l'avait repris
392	Helena	ouais non on l'a pas
393	Manuella	j'ai les dates (la frise chronologique)
394	Helena	regarde si on fait techniques donc PCR microscopie / on arrive à des / des classifi euh ouais du coup / on arrive à des classifications du coup / on peut peut-être essayer de faire un lien avec phylogénétiques / on obtient phénétique cladistique / la microscopie on va soit aller on a besoin de l'électronique soit on a besoin de l'optique après tout ça je ne sais pas
395	Manuella	faudrait peut être grossir tous les trucs non ? / je crois que tu peux tout sélectionner et faire plus gros / voilà comme ça
396	Helena	c'est plus visible
397	Manuella	parce qu'après on va avoir trop mal à la tête
398	(bref échange sur la taille de caractères)	
399	Manuella	sont définis selon les conceptions qui évoluent selon les techniques et les contextes de pensée / qui étaient
400	Helena	donc là on a du gradisme/ on a de l'évolutionnisme
401	Manuella	euh / utilisés / ou / chacun et on peut dire par exemple
402	Helena	par machin machin machin
403	Manuella	ouais
404	Helena	OK / je vais lui mettre une majuscule à lui (Whittaker)
405	Manuella	donc le gradisme
406	Helena	le gradisme / ça va jusqu'à
407	Manuella	ah y avait pas les deux autres / comment ils s'appelaient // Gasparini et / non ça / c'était pas/ c'était avec le phytoplancton
408	Helena	Whittaker / Burki je vais le mettre / un peu comme ça (à proximité d'évolutionnisme) c'est plutôt voilà
409	Manuella	il y a probabilisme
410	Helena	ah ouais / mais ça c'est dans le truc phénétique / si on utilise les méthodes probabilistes
411	Manuella	ouais Burki il utilisait surtout ça
412	Helena	sinon
413	Manuella	est-ce qu'on met sur du côté et on fait un lien / je sais pas / Linné (en Thomasbant sur ce

		concept à déplacer) c'était avec les trois règnes
414	Helena	Linné ?
415	Manuella	ouais c'était avec gradisme ça c'est sûr
416	Helena	c'est avec gradisme ça c'est sûr / mais après eux (en pointant les autres auteurs) Whittaker et Cavalier-Smith ils font / ils utilisent un peu les deux / et lui (Burki) il utilise que / ça aurait été bien qu'on mette des dates
417	Manuella	ah (rire) 1914 / 1981
418	Helena	tu vois comme ça on met une notion de temps (en écrivant 1981 après Cavalier Smith)
419	Manuella	2014 (pour Burki) / Whittaker 1969
420	Helena	et Linné lui c'est ?
421	Manuella	1735 (avec la frise chronologique)
422	Helena	1765 ?
423	Manuella	1735
424	Helena	je lui mets 30 ans dans la vue
425	Manuella	(rire) / végétaux dans la classification (marmonne comme si elle lisait la consigne de réalisation de la cmap)
426	Helena	je fais ça / alors est-ce que ça (groupe polyphylétique) ce serait pas la conclusion de Burki ? / c'est la conclusion de / ça c'est la conclusion Burki ça vraiment / groupe poly / après / ça je sais pas trop où on va le mettre [groupe polyphylétique] / arbres phylogénétiques de toute façon ça allait plus / je sais pas plus par là
427	Manuella	alors les classifications peuvent être phylogénétiques en utilisant arbres se phylogénétiques / ah oui mais ils ont utilisé d'autres arbres aussi / les "troncs" (terme peu audible) / les / j'sais pas si on en parle
428	Helena	on peut effacer arbres phylogénétiques / parce que quand on utilise la phylogénie on fait un arbre phylogénétique
429	Manuella	ouais / techniques / exemple (relié à PCR, séquençage) voilà / (relié à microscopie) / voilà ensuite / microscopie soit (électronique et optique) / là du coup (relie "PCR, séquençage" à phénétique) là qu'est-ce qu'on fait ?
430	Helena	là je sais pas si / tu vois / la cladistique euh
431	Manuella	est-ce qu'il y a besoin forcément de techniques comme celles-ci (PCR, séquençage) pour la cladistique
432	Helena	bah non
433	Manuella	bon / c'est /
434	Helena	sinon on peut mettre juste euh / observations morpho-anatomiques
435	Manuella	je sais pas où on l'a mis / voilà / euh / parce que contexte de pensée et / qui évolue selon les méthodes utilisées
436	Helena	qui évoluent selon / les méthodes utilisées c'est-à-dire / qu'est-ce que tu vas mettre/ tu vas juste euh
437	Manuella	je sais pas si du coup les méthodes utilisées / on dit du coup
438	Helena	cladistique phénétique / euh
439	Manuella	probabilisme on l'a déjà mis
440	Helena	non on ne l'a pas mis du coup
441	Manuella	pas encore / c'est pas avec gradisme et évolutionnisme ?
442	Helena	le probabilisme ?
443	Manuella	ah non non non
444	Helena	non c'est avec la phénétique
445	Manuella	enfin la cladistique aussi
446	Helena	euh non
447	Manuella	avec la cladistique le probabilisme
448	Helena	bah pour moi c'est surtout avec tu sais / les branches / où on met une notion de / je me souviens en cours avec lui (référence au cours de phylogénie précédant la séquence)
449	Manuella	c'était en lien avec la cladistique / je suis quasi sûre / alors comment on avait mis ça / euh
450	Helena	(léger rire) on n'a pas parlé de photosynthèse encore
451	Chercheur	ça va ?
452	Manuella	oui
453	Chercheur	il y a encore pas mal de concepts sur le côté
454	Manuella	ouais (léger soupir)
455	Chercheur	parce que vous les rangez / vous les placez petit à petit

456	Manuella	ouais c'est ça
457	Chercheur	ou vous hésitez ?
458	Manuella	on amis tous les termes ensemble / enfin tous les mots clés et on essaye de tous les ranger maintenant / voilà
459	Chercheur	d'accord bon courage
460	Manuella et Helena	(rire)
461	Helena	le problème c'est que / on n'a pas de place
462	Manuella	ouais je
463	Chercheur	de temps en temps un petit contrôle S pour enregistrer
464	Helena	d'accord
465	Manuella	contrôle S
466	Helena	je sais pas si ça marche du coup (c'est un mac donc Cmd S)
467	Manuella	on sait pas comment on fait
468	Helena	sinon fait (fichier) enregistrer / ça me plaît plus quand il fait un petit
469	Manuella	ouais quand il nous montre un petit truc (la fenêtre d'enregistrement) / alors je vous faire (réglage du zoom d'affichage à 50 %) / parce que ça on ne va plus s'en occuper de ça (cormus et mots associés, décalés à droite pour faire de la place)
470	Helena	ah on a encore de la place en fait
471	Manuella	ouais ouais / les végétaux un peu plus par là (à droite) / parce que je crois au minimum (réglage du zoom d'affichage à 10%) / on ne va pas de toute manière voir au minimum (les mots sont illisibles)
472	Helena	(rire)
473	Manuella	et ensuite faire une petite / je vais mettre tout le reste [déplacement de nombreux mots en bas à droite de la fenêtre] / de toute manière je ne sais pas si on va mettre tout ça / photosynthèse / vie fixée faut qu'on le mette / cyanobactéries [endosymbiose (Manuella déplace plusieurs en bas à droite de manière ininterrompue)
474	Helena	oui mais en fait on peut pas mettre vie fixée] / il faut mettre vie libre et vie fixée
475	Manuella	les théories / tu sais il y a une case / il y a les théories / les différentes théories / il y avait les différentes / techniques
476	Helena	ça on l'a fait
477	Manuella	ça on la fait
478	Helena	bah les théories c'est ça aussi / contexte de pensée
479	Manuella	ouais ouais / alors super-groupe
480	Helena	on a plein de mots qui vont dans la phylogénétique en fait / on a plein de mots là / groupe machin
481	Manuella	je me déplace carrément / attention (en tirant rapidement un mot en bas à droite avec le paquet de mots non reliés) / moléculaire je sais même pas si on va l'utiliser
482	Helena	ah bah ça c'est pas bien (rire) / oui mais en fait ça rejoint ça
483	Manuella	c'est ça c'est pour ça quand
484	Helena	ah c'est plus précis de mettre moléculaire que génétique hein
485	Manuella	ouais / donc c'était bien moléculaire alors (en passant devant le mot génétiques) / au début / ouais parce que j'ai dit moléculaires et
486	Helena	non si j'ai marqué génétiques c'est que sur le moment on a dit génétiques
487	Manuella	non mais non je pensais moléculaires et je sais plus on a eu un bug / on s'était dit moléculaire peut-être pas je sais pas pourquoi / je sais pas pourquoi / alors / je redescends (les mots optique et électronique)
488	Helena	truc horrible (probablement la mise en ordre dans la fenêtre de tous les mots)
489	Manuella	ouais / alors / PCR / c'est quoi ce lien (entre "PCR, séquençage" et "phénétique")
490	Helena	ah oui attends on n'a pas encore mis
491	Manuella	parce que là ça (« probabilisme" isolé, non encore relié à un autre concept) / ça on n'est pas sûrs encore / le truc il ne fonctionne pas quand on monte
492	Helena	du coup j'ai organisé tout ça (noms d'auteur, cladistique, gradisme...) mais ça va tout descendre
493	Manuella	ouais / alors attends / parce que ça (classifications de) / ça fait bizarre de faire ça (en déplaçant des mots les flèches se croisent)
494	Helena	c'est le soit que tu peux baisser aussi / en dessous phylogénétique
495	Manuella	pour l'instant je le mets là / effectivement c'est peut-être pas extra / peuvent être c'est en haut
496	Helena	exemple il faut le baisser aussi / usages quotidiens il faut le baisser
497	Manuella	attends / et tout ça

498	Helena	ah c'est les exemples utilitaires / ah non là il y a un problème
499	Manuella	classifications peuvent être utilitaires fonctionnelles phylogénétiques
500	Helena	ah oui d'accord oui/ parce qu'il y a des petits des grands des machins
501	Manuella	ouais ouais c'est parce qu'on n'avait pas tout euh
502	Helena	OK / donc ça / ça on change
503	Manuella	je les fais mettre ça par là du coup (les mots liés à utilitaires déplacés vers la gauche) / celui-là est vraiment petit (alimentation écrit en tout petit)
504	Helena	(rire) c'est pas grave
505	Manuella	et du coup tout ça déplace on le mettra après (le paquet de mots qui était resté au milieu) / bien / c'est chiant quand tu tournes le truc il descend pas (évoque le fonctionnement de la souris dont la molette ne marche pas) / oh /alors / du coup alors évolutionnisme
506	Helena	contextes de pensée tu peux le baisser le
507	Manuella	donc selon ça et ça
508	Helena	(blague non audible puis rire)
509	Manuella	voilà / donc tout ça je dois encore / c'est par là (nouveau déplacement du paquet de mots non reliés)
510	Helena	ça on sait pas / ça on sait pas (en parlant de cladistique et groupes monophylétiques)
511	Manuella	il y a Burki / c'est déjà pas mal (satisfaction après avoir déplacé tous les mots non reliés sur le côté droit)
512	Helena	juste change ici
513	Manuella	où ?
514	Helena	génétiques ici on doit mettre moléculaires / voilà / on va l'effacer ici / ça va en mettre un en moins
515	Manuella	alors / conceptions qui évoluent selon les techniques / contextes de pensée
516	Helena	on peut faire la défini ah ouais non mais sinon / euh / pour faire avec tout ce qui est autotrophie / photosynthèse machin et tout / il faudrait peut-être qu'on fasse comme ça quelque chose qui va / qui / justement des conceptions
517	Manuella	d'accord / euh ouais donc soit en fait un truc comme ça et après on dit qu'il dépend de ça / soit on essaie de trouver un mot un terme qui dit / les conceptions
518	Helena	tu vois je pense qu'on mettrait notre définition /donc là autotrophie (rapprochée du connecteur "sont définis selon") / photosynthèse / du coup pigments
519	Manuella	ouais mais ils sont pas tous autotrophes
520	Helena	ouais mais voilà quoi (rire)
521	Manuella	bah ouais mais bon (non satisfaite)
522	Helena	photosynthèse avec ça (O2 et CO2)
523	Manuella	paroi
524	Helena	on aura un lien avec cyanobactéries et endosymbiose / ça (eucaryotes) / ça va aller plus dans les contextes de pensée c'est-à-dire est-ce que je prends en compte / ah non ça va pas plus / est-ce que là regardes tu vois / parce que les trucs moléculaires / du coup ça fait prendre en compte les procaryotes / donc est-ce qu'on ne ferait pas un truc un peu / un lien ici / alors ça c'est tous les contextes de pensée / gradisme / cladistique du coup on fait quoi ?
525	Manuella	cladistique euh c'est dans les idéologies ouais donc ouais
526	Helena	d'accord / donc ça on avait quoi d'autre / évolutionnisme / voilà et on mettrait / Burki comme ça / Whittaker Cavalier-Smith et Linné comme ça à peut près / comme ça / ça par contre / alors lui (Burki) ça débouche sur un groupe polyphylétiques
527	Manuella	mono quand on parle de mono ?
528	Helena	ah ça je ne sais pas hein / ce serait là tu vois (en parlant du concept phylogénétiques)
529	Manuella	je sais même pas si on va l'utiliser
530	Helena	sinon euh / là on a une conception qui commence à prendre en compte les groupes monophylétiques (en montrant Whittaker et Cavalier-Smith) / lui (Burki) il a les super-groupes
531	Manuella	et il utilise le probabilisme
532	Helena	du coup on le mettrait comme ça (rapprochant probabilisme de Burki)
533	Manuella	c'est chiant qu'on n'est pas les grands trucs là / ce serait bien
534	Helena	c'est pas grave / groupe qu'est-ce qu'on en fait de ça /de groupe ? / (bruit important de quelque chose qui est frappé) / putain / mai des il y a des gens ils ont des problèmes / vie fixée il nous faut un vie libre aussi
535	Manuella	ouais
536	Helena	donc est-ce que

537	Manuella	alors (lecture de la carte en partant du début) les végétaux sont classés dans les classifications / sont composés d'une cellule ou de différentes cellules
538	Helena	est-ce qu'on se fait pas un truc sont définis
539	Manuella	bah je pensais faire ça au début [mais euh
540	Helena	sont définis / on fait avec tout ça
541	Manuella	après il y avait l'histoire des contextes]
542	Helena	et après on fait une flèche / mais dépend des conceptions
543	Manuella	d'accord / donc sont définis
544	Helena	là on enlève
545	Manuella	on le déplace on prend plus le même truc / ou alors on l'enlève et on recommence sont définis
546	Helena	je pense qu'on enlève cette partie / non il va tout m'enlever (lien entre le connecteur "sont définis selon" et "autotrophie") / attends faire comme ça (suppression du trait de liaison entre "sont définis selon" et "conceptions")
547	Manuella	alors sont définis selon euh / comment on dit / euh / leur mode trophique
548	Helena	ouais
549	Manuella	leur mode trophique on dit ? // c'était quoi ? / c'était autotrophie ou ? / végétaux ba avec un b / qu'est-ce qui disaient les autres / attends je vais voir je l'ai peut-être écrit
550	Helena	type trophique
551	Manuella	voilà / type trophique voilà //
552	Helena	type trophique
553	Manuella	ah on n'a pas mis phylogénétiques soit morpho-anatomiques soit moléculaires et fonctionnelles peut-être / où tu sais modes de nutrition / ce serait dans quoi ?
554	Helena	ce serait dans fonctionnelles plutôt / euh dans ouais
555	Chercheur	ça y est ça se remplit ?
556	Manuella	euh ouais
557	Helena	ça se construit / ce serait plus dans fonctionnelles / c'est la fonction
558	Manuella	non c'est la classification qui est fonctionnelle / là en fait la phylogénie mais avec des modes de nutrition / enfin c'est ce que faisait Whittaker
559	Helena	oui bah on en fait une autre et puis c'est tout (en ajoutant un troisième concept lié à phylogénétiques)
560	Manuella	soit mode / mode / pas mode de nutrition / c'est bizarre non ?
561	Helena	bah type trophique sinon / je remets type trophique
562	Manuella	oui voilà
563	Helena	type trophique / et du coup euh / là je mets direct autotrophie tant pis (pour remplacer "type trophique" relié aux connecteurs "sont définis selon") / sont définis selon
564	Manuella	leur autotrophie
565	Helena	autotrophie / qui implique
566	Manuella	voilà implique c'est bien
567	Helena	implique
568	Manuella	la photosynthèse
569	Helena	je vais mettre photosynthèse / qui implique elle-même des pigments / des plastes // qui nécessite (connecteur entre photosynthèse et pigments)
570	Manuella	ouais
571	Helena	qui nécessite / pigments /plastes et bah voilà / et du coup
572	Manuella	ça c'est la théorie de l'endosymbiose
573	Helena	ouais
574	Manuella	est-ce que contextes de pensée ou euh / est-ce qu'on parle des théories ? / y avait quoi comme théorie / tu sais dans la case quelles théories ont permis de
575	Helena	ah endosymbiose c'était surtout perte secondaire qui faisait débat
576	Manuella	il y avait quoi comme autre théorie ?
577	Helena	(silence) comme théorie ?
578	Manuella	est-ce que
579	Helena	ah comme théorie ? euh / bah y avait tout ce qui était cladistique et tout
580	Manuella	ouais / (propos non audible)
581	Helena	est-ce que contextes de pensée / je peux mettre contexte de pensée euh théories / théories de l'époque / j'appuie surtout moi / et on peut mettre endosymbiose / et du coup faut garder un lien avec plastes
582	Manuella	ouais / euh / qui nécessitent plastes

583	Helena	qui provient / qui proviennent
584	Manuella	ça c'est le nombre ouais
585	Helena	qui proviennent de / ça (cyanobactéries)
586	Manuella	là / endosymbiose
587	Helena	qui proviennent de ça (cyanobactéries) / grâce (rire) / je bloque sur grâce / grâce à / grâce à endosymbiose / on peut mettre primaire ou secondaire (rire)
588	Manuella	ouais c'est ça
589	Helena	je vais le mettre là (endosymbiose) / parce que du coup ça sera après / ah / d'accord // grâce à / et tu vois / on va le mettre là parce que y en a (certains auteurs) qui ont / euh plusieurs origines de l'endosymbiose
590	Manuella	oh la la / je sais pas
591	Helena	mais endosymbiose en tout cas / elle peut être primaire
592	Manuella	non là tu mets soit(comme connecteur)
593	Helena	oh / soit / primaire / soit secondaire / OK / ça j'ai l'impression que ça va pas du tout avec / regarde j'sais pas je comprends pas (le trait qui relie le connecteur "grâce à" et "endosymbiose" arrive sur le côté du rectangle endosymbiose et pas au centre) / OK / il y a des flèches nul part je comprends pas
594	Manuella	il y a un moyen de les mettre
595	Helena	ça / sont définis selon paroi/ donc on va mettre paroi cellulaire
596	Manuella	selon la présence / autotrophie paroi cellulaire direct
597	Helena	autotrophie / pourquoi ?
598	Manuella	non parce qu'autotrophie / paroi cellulaire (en montrant les mots reliés à "sont définis selon")
599	Helena	oui voilà / et ça en fait / on peut mettre directement (suppression par erreur du connecteur "composés") / oh / comment on fait retour ?
600	Manuella	c'est
601	Helena	attends attends / annuler
602	Manuella	voilà Z
603	Helena	parce qu'en fait du coup / ça on l'a inclus dans notre définition (parlant des termes reliés à "composés")/ euh / ça
604	Manuella	oui mais ça peut pas être composés / c'est définis selon / là ça va te faire une bulle / parce que c'est pas une bulle ça (c'est un connecteur)
605	Chercheur	tu ne peux pas relier deux connecteurs entre eux
606	Manuella	bah ouais
607	Helena	mais là on veut changer en fait (composés) / on a tout effacé tout à l'heure alors
608	Chercheur	qu'est-ce que tu voulais changer ?
609	Helena	je sais pas en fait / on sait pas exactement
610	Manuella	on a des problèmes avec la définition et euh / ouais / sinon ils sont définis encore selon leur composition
611	Helena	oui mais du coup il faudrait que je mette
612	Chercheur	ça tu peux déplacer
613	Helena	oui
614	Chercheur	attends je te montre / ça (lien entre végétaux et composés) tu supprimes ce lien / non / Pomme Z / euh tu vas le mettre / sont définis selon / alors ah oui selon la composition
615	Manuella	sinon on enlève composés et on met composition
616	Chercheur	voilà / et là / sont définis selon / tac (création d'un nouveau concept) / et après
617	Helena	tu veux mettre composition ?
618	Manuella	ouais / merci
619	Chercheur	plutôt organisation / parce que composition c'est bizarre / organisation cellulaire ou organisation
620	Helena	organisation / ah / soit (rire) / on va mettre que ça / donc ça est-ce que
621	Manuella	ouais bon
622	Helena	paroi cellulaire
623	Manuella	il y avait vie fixée vie libre
624	Helena	ah ouais
625	Manuella	donc c'est là / donc selon mode de vie
626	Helena	ouais mode de vie
627	Manuella	et là tu mets mode de vie soit
628	Helena	fallait pas que je fasse ça

629	Manuella	(rire) à chaque fois //soit (connecteur entre mode de vie et vie fixée) / voilà
630	Helena	voilà ça (photosynthèse) / caractérisé par des échanges (O2 et CO2)
631	Manuella	ouais / de
632	Helena	caractérisés
633	Manuella	par échange
634	Helena	par échange de / O2 et CO2
635	Manuella	voilà
636	Helena	donc tout ça c'est lié / ca y est ! / sont définis selon [
637	Manuella	les conceptions
638	Helena	et du coup] / ah ouais / est-ce que je peux / ah oui bah oui je peux
639	Manuella	sont définis selon
640	Helena	les conceptions / hein tout est connecté (satisfaction d'avoir relié la branche "sont définis selon" et la branche conceptions")
641	Manuella	ah il nous reste ça
642	Helena	alors / ça contextes de pensée théorie / ils peuvent être
643	Manuella	soit (rire d'Helena face à ce connecteur qu'ils utilisent beaucoup) / on kiffe ça
644	Helena	ouais / soit ça / soit ça // Linné il est surtout dans le gradisme
645	Manuella	utilisé tu peux mettre (entre gradisme et Linné) / utilisé par
646	Helena	ouais
647	Manuella	et après il y en a qui utilisaient plusieurs
648	Helena	utilisé par / donc voilà
649	Manuella	gradisme c'est utilisé par qui encore / par lui
650	Helena	Whittaker / Cavalier-Smith / oh la la ça va faire (mot non compris) / on va faire ça
651	Manuella	il est 18h05 (étonnée, la séance a démarré à 16h et est censée finir à 18h)
652	Helena	bah ouais
653	Manuella	ah merde je m'étais pas du tout rendue compte / c'est ouf ça
654	Helena	donc ça (évolutionnisme) utilisé par aussi / oh mince
655	Manuella	ouais utilisé par
656	Helena	utilisé par / et du coup enlève moi la petite bulle de
657	Manuella	tu voulais lier ça à qui ? / mets le directement à quelqu'un déjà
658	Helena	bah les trois là (Whittaker Cavalier-Smith et Burki)
659	Manuella	ouais vas y / hop
660	Helena	donc utilisé par
661	Manuella	on essaye de rendre ça un petit peu plus propre et après on file [dernier mot incertain]
662	Helena	ça / ça ("utilisé par" relié à Burki) / et lui aussi (cladistique) / attention
663	Manuella	lie le d'abord à qui / tu le mets d'abord à qui la cladistique ? (Helena relie cladistique à Burki)
664	Manuella	et sinon pour faire plus de place / tu déplaces tout
665	Helena	alors ça ça ça (déplacement de mots non reliés) / sinon tout ça rend on le remonte (termes à droites ayant des longs segments de lien) / on s'en / on s'en fout j'allais dire
666	Manuella	tu veux que je / c'est utilisé que par lui (Burki) cladistique
667	Helena	non non non non
668	Manuella	par qui d'autres encore ? mets le maintenant comme ça
669	Helena	lui je pense(Cavalier-Smith)
670	Manuella	ouais
671	Helena	et pas trop lui hein (Whittaker) / c'est pas encore hein
672	Manuella	non non de non vas y / ouais alors attends / et lui du coup Burki on n'a qu'à faire directement / qu'est-ce qui / [qu'est-ce qui s'est passé qu'est-ce qui s'est passé
673	Helena	c'est quoi ça] (en parlant d'une case qui est très haute)
674	Manuella	ah merde c'est moi / c'est bon c'est pas grave
675	Helena	c'est quoi ce truc / ouais mais c'est / Burki
676	Manuella	on recommence / utilisé par
677	Helena	Burki il est parti
678	Manuella	il a décollé
679	Helena	2014
680	Manuella	2014
681	Helena	hop houla
682	Manuella	c'est parce que je suis éloigné / voilà / utilisé par
683	Helena	voilà / non mais il est évolutionnisme aussi (Burki) / euh ouais ouais

684	Manuella	et là Burki / hum
685	Helena	mais on a un problème avec nos flèches / c'est ça le problème / quand même / ouais bon c'est pas grave
686	Manuella	je vais lui demander (au chercheur) / essaye du coup / qu'il
687	Helena	groupe poly du coup
688	Manuella	ouais mais c'est quoi le lien en fait / c'est pas
689	Helena	qui définit / un / groupe polyphylétique
690	Manuella	super-groupe
691	Helena	ouais mais tant pis (suppression de super-groupe) / ça c'est sa théorie à lui
692	Chercheur	je vais m'en occuper
693	Helena	en fait en un problème parce qu'à chaque fois / des fois il nous met des flèches / des fois il nous en met pas
694	Chercheur	c'est pas grave / c'est pas gênant
695	Helena	OK
696	Chercheur	ça change rien pour moi
697	Manuella	d'accord
698	Helena	des fois il y en aura / des fois il n'y en aura pas
699	Chercheur	c'est pas grave
700	Manuella	on va essayer de tout bien ranger
701	Chercheur	je comprends qu'il n'y en a pas ou qu'il y en a c'est pareil
702	Helena	d'accord / parce que c'est lui qui choisit
703	Chercheur	pas de problème
704	Manuella	OK merci
705	Helena	donc / euh / est-ce que je ne mettrai pas plutôt théories (devant endosymbiose)
706	Manuella	ouais
707	Helena	théorie
708	Manuella	parce que du coup phénétique on le mettrait où ?
709	Helena	d'endosymbiose (continue de modifier la case "Théorie de l'endosymbiose" et n'écoute pas la question de Manuella sur "phénétique") / on n'a pas mis eucaryotes et procaryotes
710	Manuella	on met / de toute manière il faut faire ça vite fait / on peut plus / là il est déjà 18 heures 10
711	Helena	ouais / ça de toute façon on ne va pas le mettre (biodiversité) / ça on va pas le mettre (espèce)/ ça on va pas le mettre (règne) / on va pas donner toutes les explications / mais en fait est-ce que c'est pas / lui (Burki et groupe polyphylétique) / par contre eux ils définissent quand même / ils définissent un groupe des végétaux quand même // euh groupe para sinon (écrit groupe paraphylétique)
712	Manuella	je sais pas si c'était ce terme là mais bon
713	Helena	euh Cavalier-Smith je crois
714	Manuella	d'accord
715	Helena	ah je sais plus / si c'est ça
716	Manuella	non non non tu fais ta flèche et tu écris là (dans le connecteur reliant "Cavalier Smith" et "groupe paraphylétique") / définit un / et là sinon en utilisant la méthode probabiliste / en utilisant le probabilisme // et du coup phénétique c'était utilisé quand ?
717	Helena	mais c'est tout ce qui est moléculaire phénétique / pour moi / donc du coup
718	Manuella	est-ce qu'on le met là ? / après moléculaires
719	Helena	mais c'est là PCR séquençage / on peut mettre euh ça et du coup on peut mettre
720	Manuella	défini (comme connecteur entre phénétique et eucaryotes procaryotes)
721	Helena	non on peut mettre / prend en compte // fait ça on fait ça on fait ça (tire les liens entre les mots) / ça je vais le remonter (théorie d'endosymbiose et mots associés) / on ne va pas se // voilà voilà
722	Manuella	à l'origine / et la méthode phénétique
723	Helena	là ? (en pointant le connecteur entre PCR séquençage et phénétique)
724	Manuella	oui / à l'origine
725	Helena	à l'origine de
726	Manuella	ouais phénétique (sous-entendu inutile de mettre méthode phénétique)
727	Helena	ouais
728	Manuella	alors / euh
729	Helena	bah c'est pas mal
730	Manuella	ouais alors il faut juste essayer de ranger / j'essaye / juste / voilà // ça il faudra le faire en plus

		gros (végétaux) / est-ce que ça va marcher
731	Helena	ouais
732	Manuella	ouais / on n'a pas le temps de me mettre des couleurs et tout
733	Helena	non non non non
734	Méava	ah horrible que ça fasse ça comme ça / euh voilà j'en sais rien (essais de déplacement de mots pour améliorer la mise en forme) / ah c'est le bordel
735	Helena	ouais mais c'est pas grave
736	Manuella	tant pis
737	Helena	au moins c'est
738	Manuella	au moins c'est fait
739	Helena	c'est lié
740	Manuella	juste / faire ici / ranger un peu // c'était bien de les avoir mis tous alignés (les noms d'auteur) // euh / faut faut / de toute manière nous il nous a donné ses diapos (chercheur) pour qu'on puisse revoir ce site (Cmaptools) / parce c'est intéressant effectivement
741	Helena	mais pas en faisant quelque chose de si compliqué quand même
742	Manuella	oui vas y a demain (parlant un voisin qui s'en va) // voilà
743	Helena	voila je pense que c'est pas mal
744	Manuella	voilà / et voilà / ouais / c'est quand même / ça va
745	Helena	enregistrement

TITRE : Entre classifications fonctionnelle et phylogénétique : le groupe des végétaux.
Une reconstruction didactique basée sur l'histoire des sciences dans le cadre de la formation des enseignants de sciences de la vie et de la Terre.

AUTEUR :
Bosdeveix Robin

RÉSUMÉ :
Cette recherche établit une dialectique entre didactique et histoire des sciences concernant les classifications biologiques, en ciblant le groupe des végétaux qui présente une multiplicité d'acceptions et une importante rectification historique.
Cette étude s'inscrit dans le cadre de la formation des professeurs de sciences de la vie et de la Terre et se structure en trois enquêtes complémentaires. La première, de nature didactique, permet d'identifier à l'échelle nationale sept conceptions des végétaux dans une situation classificatoire ouverte et d'étudier les raisonnements classificatoires convoqués dans des situations de classification fonctionnelle puis phylogénétique, ainsi que leur articulation. La seconde enquête, de nature historique, donne accès à l'évolution des idées concernant le groupe des végétaux dans la systématique du XIX^{ème} siècle à nos jours. L'accent est mis sur les problèmes que les scientifiques ont cherché à résoudre en élaborant leurs systèmes classificatoires et les obstacles rencontrés. La troisième enquête consiste en l'élaboration, la mise en œuvre et l'analyse d'une reconstruction didactique fondée sur des matériaux historiques, en l'occurrence des articles scientifiques primaires. Cette expérimentation permet d'approfondir l'analyse du raisonnement classificatoire lors d'un débat et de la construction de cartes conceptuelles. Elle vise également à caractériser les conditions de possibilité d'un enseignement basé sur l'histoire des sciences et des articles scientifiques. Une synthèse des principaux obstacles impliqués dans les classifications est dressée en comparant la façon dont ils s'actualisent dans les sphères didactique et historique.

MOTS- CLÉS :
Didactique ; histoire des sciences ; classification ; végétaux ; problématisation ; obstacle ; carte conceptuelle ; débat