HAL
open science

Modélisation et diagnostic des conceptions d'élèves de niveau seconde sur l'information génétique, lors de l'élaboration d'expérience à l'aide de LabBrook

Gwenda-Ella Chapel

▶ **To cite this version:**

Gwenda-Ella Chapel. Modélisation et diagnostic des conceptions d'élèves de niveau seconde sur l'information génétique, lors de l'élaboration d'expérience à l'aide de LabBrook. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENS011 . tel-00721782

HAL Id: tel-00721782

https://theses.hal.science/tel-00721782v1

Submitted on 30 Jul 2012

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.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : Ingénierie de la santé, la cognition et l'environnement

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Gwenda-Ella CHAPEL

Thèse dirigée par **Muriel NEY** et
codirigée par **Patricia MARZIN**

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble**
dans **l'École Doctorale EDISCE (Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement**

Modélisation et diagnostic des conceptions d'élèves de niveau seconde sur l'information génétique, lors de l'élaboration d'expérience à l'aide de LabBook

Thèse soutenue publiquement le **21 juin 2011**,
devant le jury composé de :

Mme Maryline COQUIDÉ
Professeure, IFE, Rapporteuse
Mme Marzin Patricia
Maître de conférence, Université Joseph Fourier, Co-Directrice
Mme Michau Florence
Professeure, INPG, Présidente du jury
Mme Monod-Ansaldi
Chargée d'étude et de recherche, IFE, Membre
Mme Ney Muriel
Chargée de recherche, CNRS, Directrice
Mme Laurence Simonneaux

Sommaire

Sommaire 3

Introduction 7
I. Contexte de la thèse 9
II. Choix du sujet biologique 10
III. Organisation du manuscrit 13

Première partie : Analyse du savoir de référence 15
Chapitre I : Analyse épistémologique du concept 17
I. Analyse historique 17
1) Étude de la construction du concept 18
A. Ce que l'on sait en 1880 18
B. 1880 – 1909 : Confirmations et précisions des découvertes antérieures 19
C. 1909 : Théorie de l'hérédité : accélérateur de découvertes 20
D. 1947-1953 : Six années d'intenses recherche 22
2) Obstacles épistémologiques rencontrés par les chercheurs 24
A. Mutations : facteurs d'évolution et d'hérédité 24
B. Un même matériel biologique – différentes organisations 24
C. Liens entre les différents objets biologiques 25
D. Codage de l'information génétique 25
II. Analyse du savoir scolaire 26
1) Analyse des programmes 26
2) Présentation des connaissances dans des manuels 30
A. Différents niveaux biologiques 31
B. Modifications de l'information génétique : le cas des mutations génétiques 40
Chapitre II : Analyse des difficultés d'apprentissage du concept 43
I. Le domaine de la génétique est difficile pour les élèves 43
II. Difficultés liées aux différents niveaux biologiques mis en jeu 44
III. … et au caractère abstrait du sujet 47
IV. D'autres difficultés liées à la spécificité de la structure de l'information génétique sous forme d'ADN 48
V. Difficultés liées à la caractérisation des conceptions en génétique 49
VI. Constat 50

Deuxième partie : Références théoriques et questionnement 53
Chapitre III : Cadre théorique 55
I. Conceptions et obstacles 55
1) Conceptions 55
2) Obstacles 56
II. Choix du modèle et modélisation des conceptions 57
1) Modélisation des conceptions en biologie 57
2) Le modèle cK¢ 58
III. Diagnostic des conceptions 61
1) Plusieurs types de diagnostics 61
2) Différents outils techniques 62
3) Nos modes de recueil de productions d'élèves 63
IV. Théorie des Situations Didactiques 63
V. L'élaboration d'une expérience pour diagnostiquer les conceptions des élèves 66
1) Pourquoi élaborer une expérience ? 66
2) Comment élaborer un protocole expérimental lors de l'élaboration d'une expérience ? 67

3) Différentes phases de production dans l'élaboration d'une expérience en travaux pratiques : texte, graphique, protocole 69
A. Définition et rôle des différentes productions 69
B. Hypothèses de résolution de l'expérience sous forme de texte 70
C. Les représentations graphiques 71
D. Le protocole expérimental 72
VI. Un outil au service de notre étude : LabBook 72
1) Généralités sur les EIAH 72
2) LabBook : création et présentation 73
Chapitre IV : Problématique et hypothèses 77
I. Hypothèses de travail 77
II. Problématique et questions de recherche 77
III. Hypothèses de recherche 78

Troisième partie : Expérimentation 79
Chapitre V : Méthodologie générale 81
I. Méthodologie de la création et de la mise en place de la situation 81
II. Présentation de la situation 82
III. Analyse *a priori* de la situation 85
1) Choix réalisés pour l'élaboration de la situation 85
2) Analyse *a priori* dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques 86
A. Le contrat didactique 87
B. Les variables didactiques 88
C. Le milieu 93
3) Liens entre le problème posé et le savoir scolaire 93
A. Analyse du problème biologique 93
B. Connaissances nécessaires 94
4) Objets biologiques et modification de l'information génétique sur les neuf niveaux biologiques 96
A. Détermination du nombre de niveaux biologiques 96
a) Construction de la première partie de l'expérimentation 96
b) Méthodologie de test et de l'analyse des productions 98
c) Objets biologiques et modification de l'information génétique sur six niveaux évalués et trois ajoutés 99
IV. Modélisation 103
V. Analyse préalable 109
VI. Échantillon 111
VII. Organisation pédagogique 112
VIII. Corpus 113
IX. Traitement des données 114
1) Construction de la grille d'analyse 114
2) Analyse des productions 117
A. Test des grilles d'analyse dans la deuxième partie de l'expérimentation 117
B. Conclusion de ce test des grilles d'analyse 122
C. Adaptation de l'utilisation des grilles d'analyse pour la partie finale de l'expérimentation 122
D. Rôle des tableaux croisés dynamiques 128
E. Détermination des conceptions 129
Chapitre VI : Résultats de l'expérimentation 131
I. Résultats 131
1) Analyse quantitative 131
A. Nombre de productions par élève 131
B. Niveau le plus cité 132
C. Verbe d'action le plus cité 135
D. Objet biologique le plus cité par niveau 136
E. Ensemble des productions sur un même niveau 137
F. Choix du niveau développé en fonction du niveau le plus bas dans le texte. 138
2) Analyse qualitative 139
A. Conceptions dégagées 139

B. Nombre d'élèves par conception 153
C. Problèmes de vocabulaire et d'organisation des objets biologiques 156
II. Conclusion 156

Quatrième partie : Discussion - Conclusion 159
Chapitre VII : Discussion et Perspectives 161
I. Retour sur la question et les hypothèses de recherche 161
1) Conceptions des élèves 161
2) Elaboration d'expérience et problème adaptés au diagnostic 163
3) Trois productions complémentaires 163
4) Avantages de LabBook pour notre projet 165
5) Le modèle cK¢, outil de notre étude 166
6) Liens avec les autres études du domaine 167
7) Retour sur notre situation et son analyse 170
II. Réinvestissement et Perspectives 172
1) cK¢ et d'autres notions 172
2) Démarche à suivre pour concevoir une situation de diagnostic des conceptions lors de l'élaboration d'une expérience 173
3) Vers un diagnostic automatique 174
4) Adaptation de la situation aux nouveaux programmes 175
5) Développement d'une mission SCY 175
6) Aider les élèves à dépasser leurs difficultés 175
Chapitre VIII : Conclusion 179
Bibliographie 181
Table des illustrations 187
Table des tableaux 189

Annexes 191

Annexe I : Fiche méthodologique pour orienter les élèves vers un protocole 193
Méthode pour choisir le protocole à indiquer à l'élève à partir de son texte et son dessin 195

Annexe II : Étape 1 de l'expérimentation 197
Méthodologie d'analyse des résultats 199

Annexe III : Cartes conceptuelles complètes 203
Niveau Milieu 205
Niveau Organisme 207
Niveau Organe : 209
Niveau Cellule : 211
Niveau Caryotype 213
Niveau Chromosome 215
Niveau Gène 217
Niveau ADN 219

Annexe IV : Cmap corrigées 221
Niveau Milieu 223
Niveau Organisme 225
Niveau Organe 227
Niveau Cellule 229
Niveau Caryotype 231
Niveau Chromosome 233
Niveau Gène 235
Niveau ADN 237

Annexe V : Tableaux cK⊄ pour tous les niveaux 239
Niveau Milieu 241
Niveau Organisme 244

Niveau Organe 249
Niveau Cellule 253
Niveau Noyau 259
Niveau Caryotype 263
Niveau Chromosome 266
Niveau Gène 270

Annexe IV : Codes pour l'analyse des productions des élèves (signification des codes et tableaux de codes pour chaque niveau) 275
Signification des codes et de leur valeur 277
Tableaux de codes pour chaque niveau 279

Annexe V : Liste des synonymes pour l'analyse 301
Synonymes pour les verbes d'action 303
Synonymes au niveau Milieu 313
Synonymes au niveau Organisme 315
Synonymes au niveau Cellule 319
Synonymes au niveau Chromosome 323
Synonymes au niveau Gène 325
Synonymes au niveau ADN 327

Introduction

Au cours de ce manuscrit, nous allons démontrer que l'élaboration d'une expérience comprenant un protocole expérimental permet aux élèves de mobiliser leurs connaissances. À partir de ces connaissances, nous, les chercheurs en didactique, pouvons diagnostiquer leurs conceptions sur le sujet en jeu dans l'expérience pour ensuite les modéliser. Le sujet biologique que nous avons choisi d'étudier porte sur la modification de l'information génétique. À partir de notre analyse de ce problème et en nous basant sur la Théorie des Situations Didactiques (Brousseau, 1998) et sur le modèle cK¢ (Balacheff, 1995), nous avons créé notre situation d'expérimentation. Celle-ci comprend trois parties conduisant à la production d'un texte, d'un schéma et d'un protocole. Les élèves ont travaillé sur une plateforme informatique en ligne, LabBook, qui les aide dans leur activité d'élaboration d'expérience et contient un éditeur de protocoles expérimentaux, COPEX. Grâce à cette situation, nous avons diagnostiqué les conceptions des élèves à partir de l'analyse de plusieurs de leurs productions. La motivation principale de ce travail réside donc dans la compréhension du lien entre les conceptions des élèves et l'élaboration d'une expérience. L'objectif principal en est la formalisation des conceptions.

I. Contexte de la thèse

Le travail de recherche présenté ici a été réalisé au sein de l'équipe MeTAH (Modèles et Technologies pour l'Apprentissage Humain) du LIG (Laboratoire d'Informatique de Grenoble) de l'automne 2007 à l'hiver 2010-2011. Cette équipe s'attache à créer, évaluer et exploiter des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) utilisés pour l'enseignement et la formation. Leurs objectifs sont :

- Concevoir des modèles computationnels de connaissances épistémiques et didactiques.
- Concevoir et réaliser des logiciels d'aide à l'apprentissage.
- Spécifier et développer, à l'intention des formateurs, des environnements pour la conception, la mise en œuvre et le suivi des situations actives d'apprentissage.
- Analyser les usages des EIAH.

Dans notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement à l'utilisation d'un EIAH en cours de développement, la plateforme LabBook, créée dans le but d'étayer l'élaboration d'expériences et plus particulièrement l'élaboration de protocoles expérimentaux. Nous utilisons cette plateforme dans le cadre de la didactique de la biologie. Cette recherche s'est installée dans la continuité de certains travaux de l'équipe portant sur l'élaboration, par les élèves, de protocoles expérimentaux en séance de travaux pratiques et étayée par un EIAH.

Les travaux de l'équipe sur ce thème (l'élaboration de protocoles) ont été, jusqu'en 2008, effectués dans le cadre du projet COPEX. Le projet COPEX a bénéficié d'un financement ACI " Education et formation " du Ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies, obtenu en 2005.

Ce projet était intitulé « Concevoir des Protocoles Expérimentaux pour apprendre les sciences expérimentales : des pratiques de classes actuelles à l'assistance par un environnement informatique ». Il avait pour objectif d'étudier la façon dont les élèves élaborent des protocoles expérimentaux dans plusieurs situations de travaux pratiques en sciences expérimentales (biologie, chimie, géologie, physique) au lycée et à l'université. Les recherches effectuées lors de ce projet ont permis de définir et de décrire ce qu'est un protocole en sciences expérimentales, d'établir les différentes étapes de son élaboration, de

déterminer les critères d'évaluation d'un protocole puis d'évaluer en quoi l'élaboration d'un protocole peut être un moyen d'apprentissage de différents concepts.

Pour cela plusieurs situations ont été créées et expérimentées dans diverses classes de lycées et d'université :

- En biologie, sur la caractérisation de la complémentarité spatiale de la liaison antigène - anticorps (Chapel, 2007)
- En chimie, sur le dosage d'un colorant par spectrophotométrie (d'Ham, 2009)
- En géologie, sur la détermination de l'angle facial (Marzin, 2008)
- En physique, sur la détermination d'un dipôle (Wajeman, 2009).

Les élèves devaient, à chaque fois, élaborer le protocole expérimental de l'expérience qu'ils allaient ensuite réaliser.

Ces projets, dont la plupart ont été réalisés en situation papier - crayon, ont été analysés et leurs résultats ont eu pour but de fournir des préconisations pour l'élaboration d'un logiciel étayant l'élaboration de protocoles expérimentaux : COPEX. Ce logiciel a ensuite été inclus dans une plateforme en ligne aidant l'élaboration et la structuration d'expérience : LabBook.

Clément Maisch (2010) a utilisé la première version du LabBook au cours de sa thèse sur l'influence du contexte et des rétroactions sur les raisonnements des étudiants sur la mesure (en TP de physique de première année universitaire).

Aujourd'hui, les travaux de notre équipe autour de l'élaboration d'expérience sont réalisés dans le cadre du projet SCY (Science Created by You). SCY est un projet européen de quatre ans sous la direction de l'Université de Twente au Pays-Bas et en collaboration avec des Universités de différents pays, dont les Pays-Bas, Chypre, le Canada, la Norvège, l'Estonie, l'Allemagne et la France. Le but de ce projet est de développer une plateforme informatique en ligne étayant et favorisant la mise en place de séances d'« Inquiry Learning ». Les élèves participant à ce projet doivent réaliser une mission par la démarche d'investigation. Une mission a pour point de départ un problème, un « challenge » à résoudre, sur un sujet d'actualité. Les élèves la réalisent sur le SCY-Lab, la plateforme informatique en ligne. La résolution de cette mission passe par l'élaboration de plusieurs documents, des ELOs ou Emerging Learning Objects. Ce sont, par exemple, des schémas d'objets à réaliser, des cartes conceptuelles, des protocoles de tests prenant plusieurs formes (textes, graphiques, tableaux, schémas …). Chaque document correspond à une étape de résolution de la mission et l'ensemble permet l'élaboration d'un compte rendu final pour répondre à la problématique de départ.

C'est dans l'optique future de construire une mission autour de l'information génétique et des analyses ADN, que notre situation a été créée. Nous avons donc proposé, dans notre étude, une situation demandant d'expliquer, par l'élaboration d'une expérience sur la plateforme LabBook, comment il est possible de modifier l'information génétique.

II. Choix du sujet biologique

Le choix de travailler sur l'information génétique et ses modifications est guidé par plusieurs critères auxquels cette notion devait répondre afin de la choisir. La notion devait :

- Être enseignée en seconde générale.
- Être présente plusieurs fois au cours de la scolarité.
- Être présente dans les enseignements de plusieurs pays.

- Être associée à de nombreuses représentations textuelles et graphiques.
- Être rencontrée par les élèves, dans la vie de tous les jours.
- Poser des difficultés pour l'apprentissage.

L'information génétique est une notion qui répond à l'ensemble de ces critères.

La seconde générale, première classe du lycée, est la dernière classe commune aux élèves suivant un enseignement général. Après cette année, les élèves sont orientés vers diverses filières en fonction des options qu'ils ont choisies. C'est la dernière classe au cours de laquelle tous ces élèves suivent un programme commun de SVT (Sciences de la Vie et de la Terre). Ils acquièrent une base commune en biologie avant de commencer leurs enseignements de spécialité et de suivre des cours de SVT adaptés à leur filière. C'est pourquoi nous souhaitions que la notion choisie soit enseignée en seconde générale.

C'est le cas de l'information génétique qui, enseignée à ce niveau, est présente dans le chapitre « La nature du vivant » (B.O., 2010[1]), et a pour support l'ADN.

Le deuxième critère auquel nous souhaitions que réponde cette notion est le fait d'être une notion clef de l'enseignement de la biologie, étudiée plusieurs fois au cours de la scolarité. L'information génétique répond à ce critère. Les élèves qui ont réalisé notre situation ont tous suivis les anciens programmes, en vigueur avant 2010. Nous retrouvons cette notion dans les programmes de plusieurs niveaux du collège et du lycée et notamment ceux de troisième, dans la partie « Unité et diversité des êtres humains » (B.O., 1998[2]) et ceux de seconde dans la partie « Cellule, ADN et universalité du vivant » (B.O., 1999[3]).

La notion d'information génétique est étudiée au lycée ou dans une structure d'enseignement équivalente dans de nombreux pays, comme en témoignent la littérature en didactique des sciences : au Royaume-Uni (Bahar, Johnstone et Hansell, 1999), au Japon (Morimoto, 2002), aux Etats-Unis (Pfriedrichsen et Stone, 2004), au Pays-Bas (Knippels, Waarlo et Boersma, 2005), en Israël (Zion et al., 2006), en Australie (Tsui et Treagust, 2007) et en Tunisie (Khattech et al., 2007) pour ne prendre en compte que les articles les plus récents sur ce sujet. De plus l'analyse comparée des programmes effectuée dans le cadre du projet SCY entre la France, L'Estonie, la Norvège et les pays Bas, a montré un fort degré de recouvrement entre eux à propos de cette notion.

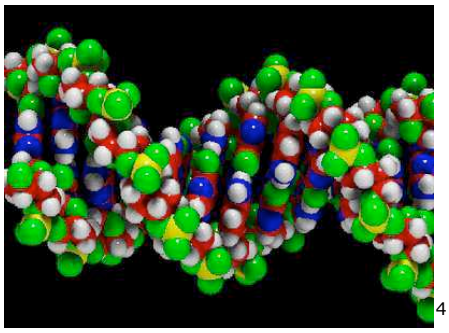
L'étude de cette notion, en établissement scolaire, se fait souvent par l'intermédiaire de modèles ou de maquettes qui présentent de multiples représentations du même objet biologique. Ses représentations peuvent être textuelles ou graphiques.

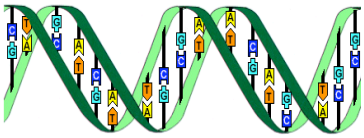
---

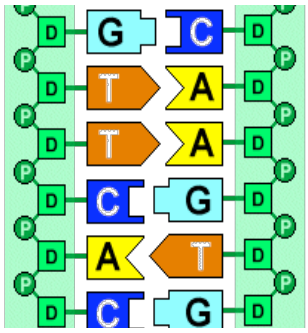
[1] Bulletin officiel du ministère de l'éducation nationale (2010). *Programme de Sciences de la Vie et de la Terre en seconde générale et technologique*. B.O. spécial, n°4, 29 avril 2010.

[2] Bulletin officiel de l'éducation nationale (1998). *Programme des classes de troisième des collèges*, vol.2, Sciences de la Vie et de la Terre. B.O. Hors-série, n°10, 15 octobre 1998, 115-124.

[3] Bulletin officiel de l'éducation nationale (1999). *Programme des lycées*, vol.2, Nouveau programme de Sciences de la Vie et de la Terre. B.O. Hors-série, n°6, 12 août 1999, 25-28.


[4]


[5]



[6]

Figure 1 : Différentes représentations graphiques de l'ADN

Ces exemples d'illustrations représentent tous le même objet biologique. Ce sont des représentations différentes que les élèves peuvent rencontrer à la fois dans leurs manuels, pendant les cours, mais aussi dans leur vie quotidienne, en dehors du contexte scolaire et notamment, par le biais des médias.

L'ADN et l'information génétique sont des notions qui font l'objet de nombreux articles scientifiques, plus de 40 000 par an et même plus de 50 000 en 2002 et 2003 (cinquantenaire de la découverte de la structure de l'ADN), qui sont ensuite repris et résumés dans la presse de vulgarisation (Mondot, 2003) à laquelle les élèves ont facilement accès (CDI, Abonnements papier, internet…).

De plus, c'est une notion dont les élèves peuvent entendre parler aux informations télévisées ou radiophoniques au vu des avancées conséquentes réalisées dans le domaine de la génétique : séquençage entier du génome de l'organisme X, rôle du gène Y dans la maladie Z… Cette notion est présente lors des enquêtes criminelles réelles ou fictives présentées et relayées par les médias.

En effet, de nombreux élèves ont connaissance de séries telles que « Les experts » faisant intervenir des tests ADN pour comparer l'information génétique d'un suspect à celle de l'assassin, ou utilisée dans le cadre d'un test de paternité. Ces tests sont aussi souvent cités dans les actualités concernant la résolution d'affaires criminelles. De la fiction, ces notions passent alors dans la réalité et deviennent concrètes.

Nous pouvons ainsi constater que ce sont des notions présentes dans la vie extrascolaire des élèves et dont ils entendent souvent parler, mais auxquelles ils ne donnent pas toujours un sens correct scientifiquement parlant. C'est une des raisons qui nous a fait choisir l'information génétique. Nous souhaitons que les élèves, en dehors du contexte scolaire, comprennent une notion à laquelle ils sont souvent confrontés.

Enfin, l'information génétique est une notion qui pose problème aux élèves, comme nous le verrons plus amplement au cours de l'analyse de la littérature et dans notre étude. Ce concept est difficile pour les élèves aussi bien pour la compréhension de sa structure sous forme d'ADN (organisation sous forme de code, des nucléotides, phosphates et sucres organisés en double hélice) que de sa localisation dans le noyau des cellules eucaryotes mais également de son rôle dans la détermination des caractères d'un individu.

---

[4] http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=6118
[5] http://espace-svt.ac-rennes.fr/cartelec/cartelec_lyc/premiere_s/vegetal/adn/adn.htm
[6] http://espace-svt.ac-rennes.fr/cartelec/cartelec_lyc/premiere_s/vegetal/adn/adn.htm

L'information génétique est un concept qui correspond à l'ensemble des critères auxquels nous voulions que réponde la notion biologique de notre étude. C'est une notion enseignée tout au long de la scolarité mais principalement en troisième et seconde avec l'explicitation de son organisation sous forme d'ADN. De plus, elle pose des difficultés de compréhension aux élèves, mais il est néanmoins nécessaire de la comprendre, car c'est une notion qui fait partie de la vie quotidienne des élèves et qui est très présente dans les médias.

La maîtrise de cette notion est importante pour prendre part à des débats et pour comprendre des questions éthiques centrales pour la société. Ces questions et ces débats sont largement relayés par les médias et c'est aussi une mission de l'école de former des citoyens aptes à donner un point de vue éclairé sur ces questions.

Proposer une formalisation des conceptions est indispensable pour aider les élèves à comprendre le monde qui les entoure. De plus, le travail sur les conceptions est un sujet de recherche très important dans le domaine de la didactique comme le montrent les nombreuses études sur ce sujet et les modèles de formalisation déjà proposés.

III. Organisation du manuscrit

L'originalité de mon travail est de réaliser plus spécifiquement la modélisation et le diagnostic des conceptions des élèves sur la modification de l'information génétique, au cours d'une situation d'élaboration d'expérience. L'exposé de mon travail est organisé en plusieurs chapitres détaillés dans ce manuscrit, chacun étant un élément essentiel au bon déroulement de cette étude. Ces chapitres sont regroupés deux par deux dans de grandes parties représentant les différentes étapes du travail réalisé :

- Analyse du savoir.
- Références théoriques et questionnement.
- Expérimentation.
- Discussion et conclusion.

La première partie de ce manuscrit porte donc sur l'analyse du savoir biologique en jeu dans la situation proposée aux élèves : la modification de l'information génétique. L'analyse historique a été réalisée par une étudiante de notre équipe au cours de son Master 2 (Fayolle, 2009). J'ai réalisé l'analyse des programmes ainsi qu'une analyse du savoir enseigné. L'ensemble des ces analyses nous permet de dégager des obstacles à l'apprentissage de cette notion. De plus, l'état de l'art réalisé, permet de constater que les difficultés liées à ces obstacles se retrouvent au cours de l'apprentissage de la génétique chez les élèves de plusieurs pays.

Certaines de ces précédentes recherches constatent ces difficultés d'apprentissage. D'autres s'attachent à étudier l'évolution conceptuelle. Peu d'entre elles proposent une formalisation des conceptions des élèves sur l'information génétique et aucune, à notre connaissance, pour l'ensemble des niveaux biologiques présents en génétique. Cela serait pourtant une base importante pour des études aidant les élèves à dépasser leurs difficultés. Je me propose de combler ce vide par ma recherche portant sur la formalisation des conceptions d'élèves et ce, en vue de réaliser un diagnostic de leurs conceptions sur l'ensemble des niveaux biologiques, au cours d'une situation d'élaboration d'expérience sur la modification

de l'information génétique. L'utilisation, par la suite, de ces conceptions pourra servir à une étude visant à aider les élèves à dépasser leurs difficultés.

Pour atteindre mon objectif, j'ai identifié un cadre théorique que je présente dans ma deuxième partie. Pour la formalisation des conceptions, j'utilise le modèle cK¢ qui s'appuie sur la Théorie des Situations Didactiques. Cette théorie est aussi utilisée lors de la création de la situation que je propose aux élèves, afin de diagnostiquer leurs conceptions. La création de cette situation s'appuie sur les travaux réalisés par l'équipe sur la modélisation des tâches de l'apprenant lors de l'élaboration d'une expérience et le rôle de l'élaboration d'un protocole expérimental pour faire le lien entre le référent empirique et le référent théorique. Dans la situation que je propose, les élèves ont pour consigne d'élaborer une expérience pour modifier l'information génétique. La réalisation de la situation passe par la création de trois productions : un texte, un dessin et un protocole expérimental, cela afin de recueillir des productions sous différents formalismes. Nous pourrons ensuite modéliser leurs connaissances en conceptions, à l'aide de l'outil de formalisation que nous avons créé à partir du modèle cK¢. Cette situation met en œuvre la plateforme web LabBook qui structure la tâche d'une élaboration d'expérience et qui aide ainsi les élèves.

Une fois notre cadre théorique et notre cadre biologique définis, nous pouvons dégager nos questions de recherche et les exprimer plus en détail à la fin de cette deuxième partie. Chaque question me permet d'émettre des hypothèses que je tenterais de valider ou d'invalider par la mise en place, l'analyse et l'exploitation des résultats de ma situation.

Afin de répondre à ces questions et hypothèses de recherche, j'ai construit et fait fonctionner une situation. La troisième partie de ce manuscrit regroupe l'ensemble des données liées à cette expérimentation : de la création de la situation à son application, en passant par la formalisation réalisée avec le modèle cK¢ et en terminant par l'analyse des résultats.

Une fois cette situation créée et expérimentée, l'utilisation des grilles d'analyse que j'ai construites m'a permis d'obtenir des résultats quantitatifs et qualitatifs. J'ai pu ainsi identifier le niveau biologique principal auquel les élèves souhaitent modifier l'information génétique ainsi que le mode d'action qu'ils choisissent et l'objet biologique sur lequel ils agissent. Cela m'a aussi permis de modéliser neuf conceptions et de pouvoir les attribuer à la moitié des élèves ayant réalisés la situation.

L'ensemble de ces résultats me permet de développer une quatrième partie reprenant mes questions et hypothèses de recherche : la discussion. J'ai pu ainsi mettre en évidence que la formalisation des connaissances que j'ai développée est opérationnelle pour faire du diagnostic de conceptions en biologie. Dans cette partie, je peux également remarquer quelques limites de ma situation et proposer des améliorations et des adaptations possibles.

De plus, mon travail m'a permis de créer et de tester une situation dans le cadre de l'élaboration d'une expérience mais aussi une méthode de modélisation et de diagnostic manuel des connaissances. Cette étude m'a également permis de développer une démarche à suivre pour réaliser une telle situation, que je me propose d'appliquer, par la suite, à d'autres notions et d'autres domaines. Enfin, entre autres perspectives, le développement du site web LabBook que nous utilisons, passera par le diagnostic automatique et le retour, aux élèves, de feedback pour tenir compte de façon automatique de la structure de leurs protocoles ainsi que des connaissances mobilisées.

Première partie : Analyse du savoir de référence

Chapitre I : Analyse épistémologique du concept

Le travail présenté dans ce manuscrit porte sur la notion biologique de la modification de l'information génétique. Avant de commencer le travail de création d'une situation didactique nous avons réalisé une analyse didactique des concepts en jeu. L'analyse didactique présentée ici comprend une analyse historique et une analyse du savoir scolaire. Elles nous permettent d'identifier les caractéristiques didactiques et épistémologiques de ce savoir. Nous pouvons ainsi étudier la construction de la notion d'ADN et d'information génétique lors de sa découverte par les chercheurs.

L'analyse du savoir scolaire nous apporte des renseignements sur le niveau de formulation choisi pour l'enseignement, les choix didactiques effectués ainsi que la transposition didactique mise en place.

Ces analyses nous permettent de mieux appréhender la notion que nous souhaitons travailler, de dégager des obstacles à la fois historiques et liés à l'apprentissage pour ensuite pouvoir analyser le problème biologique posé aux élèves dans le cadre de notre situation.

I. Analyse historique

L'étude historique d'un concept, d'une notion permet, en didactique, de reconstruire chronologiquement les étapes de la découverte de ce concept et d'identifier les obstacles auxquels les scientifiques se sont heurtés au cours de son élaboration. Le repérage de ces obstacles n'est pas utilisé dans le but de faire un parallèle strict entre la découverte du concept et l'apprentissage par les élèves de ce concept. L'objectif est de permettre de prévoir les obstacles et les difficultés que les élèves sont susceptibles de rencontrer lors de leur apprentissage, et d'élaborer des stratégies à mettre en œuvre pour les dépasser. Ainsi nous pouvons expliciter le savoir visé avec toutes ses caractéristiques et ses difficultés. Cette étude peut permettre de formuler des hypothèses sur les possibles difficultés des élèves lors de l'apprentissage de ce concept. Pour cela il est nécessaire de distinguer les différents types d'obstacles qui peuvent être techniques, sociaux ou épistémologiques.

L'étude historique de la découverte de l'ADN et l'identification des obstacles associés à ces découvertes a fait l'objet d'un Master de deuxième année de Didactique de la Biologie, présenté par Hélène Fayolle en juin 2009 (Fayolle, 2009). Dans la première partie de ce chapitre (I.1 et I.2), nous nous inspirons de ce travail pour mettre en avant les étapes clefs de la découverte de ce concept et les principaux obstacles rencontrés par les scientifiques.

Ce travail s'articule autour des questions que les chercheurs ont eu à résoudre pour le modèle contemporain de l'ADN, support de l'information génétique : la succession de nucléotides structurés en double hélice (structure connue et enseignée actuellement). Les travaux de recherche se sont organisés autour de plusieurs pôles : la transmission des caractères et de l'hérédité, l'évolution des espèces, la nature du support de l'hérédité et les modifications du support. Cette analyse historique est présentée chronologiquement.

1) Étude de la construction du concept

A. Ce que l'on sait en 1880

Les travaux sur l'information génétique et le support de l'hérédité s'appuient sur plusieurs connaissances et théories du début du XIXe siècle. Tout d'abord, le noyau, observé par les microscopistes depuis le XVIIe siècle, a été qualifié, en 1831 par Robert Brown, de constituant essentiel et permanent de la cellule. Cela a permis de renforcer la théorie cellulaire proposée par Dutrochet en 1824. Jusqu'en 1859, les travaux sur la cellule amènent tous les scientifiques à penser que le protoplasme (ensemble des constituants de la cellule) est le support de l'hérédité et que cette hérédité est obtenue par mélange des caractères des parents.

Mais à partir de 1859, plusieurs découvertes vont bouleverser ces idées. Darwin publie son ouvrage sur l'évolution : « *De l'origine des espèces* ». Darwin propose les idées de sélection naturelle et d'adaptation au milieu pour expliquer l'évolution de la diversité des populations. Pour lui l'évolution des espèces et la biodiversité sont dues à la rencontre de caractères aléatoires internes avec des facteurs du milieu (l'adaptation) et rendent les populations aptes à des modes de vie particuliers. Les mutations, qui sont alors appelées « Caprices de la nature » (Sports of nature), ne sont pas considérées comme des facteurs de l'évolution puisque les chercheurs de l'époque pensent qu'elles disparaissent au fur et à mesure des générations.

Darwin se heurte à un obstacle lié à sa théorie de l'évolution : le lien entre mutation, évolution et hérédité n'est pas fait par les autres scientifiques.

Darwin explique que les variations sont dues au hasard, à un meilleur taux de reproduction de certaines espèces dont la constitution héréditaire favorise la survie (« la survie du plus apte ») et aux caractères favorables qui s'accumulent au fil des générations. A l'époque, la transmissions des caractères héréditaires s'explique par le rôle des gemmules qui deviendront par la suite les pangènes.

Les pangènes ont été caractérisés, en cette deuxième moitié du XIXe siècle, par de Vries à partir des hypothèses de Weismann. Les pangènes sont définis comme des facteurs héréditaires se trouvant dans le noyau de la cellule. Ce sont des entités physiques qui correspondent aux caractères et sont transmises de génération en génération. De ces facteurs a découlé une théorie : la théorie de la pangenèse cellulaire, bien que ce support caractérisé comme physique, n'ait jamais été observé (Vignais, 2001).

L'émergence du rôle des « facteurs héréditaires » se retrouve aussi dans les travaux de Mendel menés de 1856 à 1865, même si à cette période, ils restent peu connus et peu acceptés. Mendel, en menant des expériences de croisements sur des pois, va apporter de nombreuses connaissances. Tout d'abord, par des expériences sur le monohybridisme (croisement expérimental portant sur un seul caractère), il identifie des caractères dominants et récessifs et les spécifie. Ensuite, par le dihybridisme (deux caractères mis en jeu), il déduit que les supports des caractères héréditaires sont des facteurs distincts et indépendants : ce sont les facteurs particulaires porteurs de l'hérédité (Vignais, 2001). Cette découverte entraîne « le passage de l'idée d'hérédité par mélange à l'idée d'hérédité particulaire » (Fayolle, 2009, p.10)

Mais les travaux de Mendel n'ont pas été admis rapidement par la communauté scientifique. **Ils étaient peu connus, peu communiqués, mais surtout, les connaissances sur la cellule et la méiose, qui étaient presque inexistantes à l'époque, ont été un obstacle majeur à l'acceptation des recherches de Mendel.**

Tout de même, ces travaux ne laissent pas insensibles certains chercheurs comme Haeckel, qui, en 1866, propose une sorte de synthèse des dernières découvertes. Il expose le fait que les facteurs qui sont responsables de la transmission des caractères héréditaires se trouvent dans le noyau (Marty, 2003).

Le noyau est vraiment considéré comme un élément important de la transmission des caractères et Miescher, en 1869, décide de caractériser chimiquement les constituants qui le composent. En réalisant ces caractérisations, il retrouve des protéines et des lipides, mais il va aussi découvrir un nouveau composé du noyau, inconnu jusqu'alors. Ce n'est pas une protéine (puisqu'il résiste à la pepsine), et il a des propriétés acides. Miescher appelle ce nouveau composé : la nucléine. Il décide alors de poursuivre ses analyses afin d'obtenir plus d'informations sur ce composé qu'il retrouve dans les noyaux de différentes espèces. Il va ainsi constater que la nucléine est composée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, et d'azote comme de nombreuses autres biomolécules découvertes à ce moment (lipides, protéines, sucres), mais en plus, chose inhabituelle, la nucléine contient du phosphate (Vignais, 2001).

Ce composé n'est donc pas une protéine, ce qui fait apparaître un nouvel obstacle qui sera très difficile à dépasser : le facteur qui transmet l'hérédité doit être de nature protéique. Selon les scientifiques de l'époque, un facteur non protéique ne peut transmettre l'hérédité.

Parallèlement, en 1870, les scientifiques obtiennent une description précise de la mitose et les bâtonnets visibles dans le noyau à certains moments de cette mitose sont appelés chromatine par Flemming.

Pendant ce temps, Miescher, qui s'intéresse toujours à l'étude de l'hérédité, est intrigué par le composé qu'il a découvert. Il émet l'hypothèse suivante : la transmission des caractères de l'hérédité se fait par l'intermédiaire de la nucléine. Mais il rejette son hypothèse car il pense qu'une seule et même substance ne peut conduire à la diversité des espèces (Dahm, 2008).

C'est un nouvel obstacle qui est mis à jour et qui, lui aussi, persistera longtemps. « la diversité des espèces impose des mécanismes complexes et divers. » (Fayolle, 2009, p.14). Une même molécule ne peut être le support de l'hérédité de caractères variés et pour différentes espèces, ce ne peut pas être une substance commune à toutes les espèces.

B. 1880 – 1909 : Confirmations et précisions des découvertes antérieures

De 1880 à 1882, Kossel va confirmer l'existence de la nucléine dans le noyau, sa composition en phosphates et son non-caractère protéique. Il met également en lumière la relation qui existe entre le phosphate de la nucléine et la quantité de noyaux. Il détermine que le rapport entre les deux est toujours constant quel que soit le tissu, et en déduit une relation.

Mais il va aller plus loin dans l'étude de la nucléine. Il découvre qu'elle est composée de deux types de bases différentes : les purines (A-G) et les pyrimidines (T-C-U) qu'il différencie par leur composition chimique.

Lors de l'année 1888, Waldeyer et Hertwing confirment et précisent toutes les découvertes récemment effectuées. Waldeyer change le nom des bâtonnets présents dans le noyau pendant la mitose : d'un ensemble appelé chromatine, ils deviennent des entités à part entières : les chromosomes. Hertwing, quant à lui, indique l'importance du noyau dans la division cellulaire.

S'en suivent plusieurs recherches d'ordre chimique, centrées sur la nucléine, ce nouveau composé du noyau qui doit avoir un rôle dans l'hérédité, puisqu'il est dans le noyau. En 1889, Altmann confirme le caractère acide de la nucléine et change son nom en acide nucléique. Il continue à affiner la structure chimique de cet acide et montre, en 1891, que l'acide nucléique contient un ose (sucre). La même année, Hammarsten nomme cet ose : pentose, qui deviendra plus tard le ribose, en 1908 avec Levene et Jacobs. Kossel, lui, découvre un ose différent dans les cellules du thymus qui sera appelé désoxyribose en 1929 par Levene, par opposition au ribose. Ces découvertes chimiques sont liées à celles réalisées dans le domaine de la physique.

En 1896, Kossel et Flemming établissent que la chromatine est assimilée à la nucléine, donc que les chromosomes sont de l'acide nucléique.

À la fin du XIXe siècle, les scientifiques sont d'accord pour dire que le matériel nucléique des chromosomes présents dans le noyau est impliqué dans la transmission des caractères. Mais un obstacle persiste, il s'agit de la nécessité, pour le facteur qui transmet les caractères héréditaires, d'être de nature protéique. C'est dû au fait, qu'à l'époque, c'est la base chimique de la vie et que la grande diversité des protéines est forcément à l'origine de la diversité des espèces. **Il y a donc un obstacle à identifier l'acide nucléique comme étant le support de l'hérédité à cause de sa nature chimique.**

Parallèlement aux recherches sur la nature du facteur permettant la transmission de l'hérédité, les recherches sur l'évolution continuent. De Vries, en 1900, met en évidence des variations discontinues héréditaires qu'il nomme mutations et indique leur rôle principal dans l'évolution. Il fonde ainsi la théorie discontinuiste de l'évolution (Vignais, 2001). **Mais de Vries fait une erreur puisqu'il interprète mal les lois de Mendel et assimile dominance/récessivité et mutation.** « la discontinuité due à la mutation est rapportée à la discontinuité que Mendel avait produite dans l'hérédité. » (Fayolle, 2009, p.15). Cela a donc été un obstacle dans les recherches suivantes qui voulaient étudier les caractères héréditaires par le biais des mutations.

Entre 1902 et 1903, Boveri et Sutton prolongent ces études, par des expériences faisant varier les conditions de fécondation (ovule énucléé…). Ils confirment que l'information génétique d'un individu se trouve bien dans le noyau de ses cellules, car avant cela n'avait été que supposé et pas prouvé. De plus, ils démontrent que pour une paire de chromosomes dans un œuf fécondé, il y a un chromosome qui vient de la mère et un chromosome qui vient du père. Ils posent ainsi les bases de la théorie de l'hérédité complétée par Stevens lorsqu'il découvre les chromosomes sexuels en 1904 - 1905. Cela permet d'ailleurs à Stevens de faire le lien avec la détermination du sexe (Vignais, 2001).

C. 1909 : Théorie de l'hérédité : accélérateur de découvertes

Suite à ces découvertes, Johannsen en 1909 remplace le terme facteur de l'hérédité par le terme gène qui est une simplification de « pangène ». Il définit le gène comme un principe, une abstraction, une « unité de calcul » qui influence le phénotype dans un œuf fécondé. Le gène est donc, pour lui, différent d'une entité moléculaire. Lors de ses recherches, Johannsen va également définir les termes génotype et phénotype employés encore actuellement.

La même année, 1909, Levene et Jacobs définissent les constituants d'un nucléotide : une base (purique ou pyrimidique), un ribose et un phosphate.

En 1910, Morgan précise la théorie de l'hérédité en la transformant en théorie chromosomique de l'hérédité. En effet, il établit clairement que les facteurs héréditaires, appelés maintenant gènes, sont portés par les chromosomes qui sont eux-mêmes localisés dans le noyau de la cellule. Par cette information, il précise donc la théorie. L'année d'après, 1910, Morgan, qui continue à caractériser les chromosomes, découvre un lien entre un caractère et un chromosome (en premier les liens avec les chromosomes sexuels). Il obtient cette association en menant des expériences utilisant les mutations. Dès lors, les mutations vont devenir un outil pour déterminer les associations caractère - chromosome puis caractère - gène. Les liens génotype/phénotype sont alors plus explicites.

Mais au même moment, Strasburger, par coloration des chromosomes, découvre que ceux-ci disparaissent un moment lors du cycle cellulaire (Vignais, 2001). **Cela entraîne un doute sur la réelle fonction des chromosomes dans l'hérédité puisqu'à l'époque, les scientifiques pensent que le matériel héréditaire doit être constant, identifiable et présent à toutes les étapes du cycle cellulaire.** Cette idée va faire obstacle à la découverte du support de l'information génétique pendant plusieurs années.

Après ces découvertes de l'association d'un gène à un caractère, les recherches sur les gènes continuent. En 1912, Muller démontre qu'il existe des gènes différents et qu'ils ont une structure interne non répétitive. Il obtient ces résultats grâce à l'observation de gènes aux rayons X (Marty, 2003). Un gène est donc « un « modeleur » qui forme sa propre copie près de lui. Il fonctionne comme un patron de construction modifiable par mutation » (Fayolle, 2009, p.11).

Trois ans plus tard, en 1915, Morgan définit le gène comme étant une unité de recombinaison et réussit à localiser un gène sur un locus précis de chromosome. Par la suite, il va calculer les écarts entre les gènes et inventer une nouvelle mesure, encore utilisée aujourd'hui, le centiMorgan.

Parallèlement, d'autres scientifiques continuent à travailler sur les acides nucléiques. Mathews, en 1916, annonce que la chromatine contient divers acides nucléiques qui ont un rôle de squelette dans la molécule. Ils sont également attachés aux protéines, actives dans la transmission de l'hérédité. C'est ainsi qu'en 1920, Levene est persuadé que les quatre bases, identifiées par Kossel en 1882, se trouvent en proportion égale dans la chromatine. **Il propose alors un modèle : le motif tétranucléotidique (répétition du motif : A-T-C-G) qui persistera jusqu'en 1945, car proposé par un groupe de forte renommée à l'époque, et constituera un obstacle majeur à la découverte de la structure de l'ADN** (Vignais, 2001).

En 1926, Muller, dont l'objet d'étude est toujours le gène, le définit comme la particule ultime à la base de la vie. Il réalise, en 1927, la première irradiation aux rayons X de drosophiles pour observer les effets sur la descendance (Vignais, 2001). Delbrück, qui mène aussi des expériences avec des rayons X pour observer les gènes, est confronté à des difficultés. Il constate qu'il est difficile d'observer des gènes aux rayons X puisqu'on n'en connaît pas la nature chimique. Il s'intéresse alors aux résultats de Muller et propose la conclusion suivante à ses expériences : une mutation est un phénomène de passage entre deux états stables d'un gène. Cela signifie qu'un gène peut avoir plusieurs états stables (Marty, 2003).

Enfin, en 1935, Muller, Timofeef-Ressovsky, Zimmer et Delbrück identifient une substance cible des rayons X et contenue dans les gènes. Les gènes sont alors identifiés comme jouant un rôle dans l'hérédité. Malheureusement, cette découverte n'est pas très suivie puisque la même année, la nature protéique des virus, considérés comme de l'ADN presque pur, est

découverte (Vignais, 2001). **Cela renforce l'idée que les protéines sont le support de l'hérédité. C'est un obstacle qui persiste encore presque 70 ans après sa première apparition.**

Mais cet obstacle n'empêche pas certains chercheurs de continuer à travailler sur les acides nucléiques et la chromatine. C'est d'ailleurs en 1935 que l'acide nucléique est qualifié d'acide désoxyribonucléique ou ADN. Ainsi, Astbury et Berral mettent en évidence la structure périodique de l'ADN en 1937. L'ADN est alors considéré comme une molécule monotone formée de la répétition d'un acide nucléique (par exemple : AAAAA) (Vignais, 2001). Astbury et Bell proposent en 1938 un modèle d'organisation de la structure de l'ADN suivant cette monotonie. Ce modèle est un empilement de composants plats qui représentent chacun un acide nucléique (appelé nucléotide). Ce modèle est rejeté rapidement de par sa planéité, mais pas par sa monotonie.

Simultanément, en 1938, Schultz fait le lien entre l'activité, la reproduction du gène et le métabolisme des acides nucléiques, ce qui permet à Caspersson, en 1941, de décrire le rôle de l'acide ribonucléique (ARN) dans la synthèse des protéines. Caspersson déclare que les acides nucléiques aident les protéines à se répliquer et que les protéines chromosomales sont des protéines spéciales. Les gènes deviennent alors des nucléoprotéines (protéine + acide nucléique) et ont un rôle indirect dans la transmission de l'hérédité (Marty, 2003). **On retrouve toujours ici le paradigme protéique très fort qui fait obstacle à la découverte du réel rôle des gènes.**

À la suite de ces travaux, mais toujours en prenant en compte la nécessité de la nature protéique du support de l'hérédité, Delbrück, en 1941, établit un modèle définissant le rôle du gène. Pour lui, il agit comme une enzyme, mais n'en est pas une, et catalyse l'autocopie des protéines cellulaires. Il détermine alors que les enzymes sont les seules aptes à remplir une fonction, un rôle héréditaire et que les gènes ne sont pas le support de l'hérédité mais seulement un outil de synthèse des protéines.

L'année 1941 est une année fructueuse en découvertes, puisqu'au même moment, Hollaender identifie la longueur d'onde du spectre UV créant les mutations comme étant la même que la longueur d'onde d'absorption des acides nucléiques. Il conclut bien que le gène est composé d'acides nucléiques mais ensuite, la deuxième partie de son interprétation est fausse : les acides nucléiques sont des capteurs d'énergie (Marty, 2003). **Cette notion de capteur d'énergie puis de transfert de l'énergie à la protéine porteuse de l'information génétique constitue un nouvel obstacle lié à la nécessité, pour le facteur transmettant l'hérédité, d'être de nature protéique.**

En 1945, Schrödinger démontre que le gène a une organisation apériodique et Caspersson confirme que les acides nucléiques sont bien dans les noyaux des cellules, par le biais d'une estimation quantitative des constituants chimiques du noyau. « Le chromosome devient ainsi une fibre protéique avec des différenciations nucléoprotéiques » (Fayolle, 2009, p.19). De plus, Caspersson établit une corrélation entre acide nucléique et dédoublement des gènes par observation de l'augmentation puis de la diminution du contenu du noyau en acide nucléique. Tout cela va entraîner une remise en cause de la monotonie de la molécule d'ADN. Son rôle dans l'hérédité est de plus en plus évoqué mais en gardant toujours comme structure le gène qui est à la fois de nature protéique et de nature nucléique.

D. 1947-1953 : Six années d'intenses recherche

À partir de 1947, les recherches se concentrent plus sur l'ADN. Stern (un chimiste) avance une théorie qui donne à l'ADN une spécificité génétique : séquence et orientation des bases

(Marty, 2003). Ensuite en 1950, Wilkins présente un cliché de diffraction aux rayons X d'un cristal d'ADN et Schrödinger déclare que l'hérédité correspond à la transmission d'une substance avec un ordre physique stable et défini. Chargaff, lui aussi, cherche à caractériser l'ADN et remarque ainsi qu'un ADN est spécifique de l'espèce dont il est issu. De plus, il démontre qu'il existe deux groupes d'ADN (contrairement au motif tétranucléotidique qui avançait une égalité entre bases puriques et bases pyrimidiques). Ces découvertes permettent justement de dépasser le paradigme du tétranucléotide et Chargaff expose même le fait que la proportion entre les bases suit des lois particulières : même proportion entre A et T et entre C et G (Marty, 2003).

C'est alors que Pauling, en 1951, trouve la structure hélicoïdale des protéines dont Watson et Crick se servent pour présenter un premier modèle d'ADN : une structure en hélice avec trois chaînes. Pauling, en 1952, développe ce modèle à triple hélice en détaillant son squelette : le sucre et le phosphate sont à l'intérieur et les bases à l'extérieur, le tout est assemblé par des ponts hydrogènes.

Mais ce modèle à trois chaînes est rejeté par les chimistes car il n'est pas possible qu'il y ait des ponts hydrogènes entre des molécules ionisées, des résidus phosphates acides.

Toujours en 1952, Hershey et Chase, qui font partie du groupe des phages (groupe très influent à l'époque et qui étudie la génétique bactérienne par l'intermédiaire des phages de 1940 à 1960 (Morange, 1994)) confirment les expériences d'Avery de 1944 et le fait que l'ADN est bien le support de l'hérédité.

Au printemps 1952, Franklin obtient des images de diffraction de l'ADN aux rayons X qui vont permettre de déterminer plus précisément le squelette de la molécule :

- Les bases sont à l'intérieur.
- Le sucre et le phosphate sont à l'extérieur.
- L'hélice est constituée de deux chaînes.

La détermination du squelette de la molécule est l'élément déterminant qui permet à Watson et Crick de présenter, le 12 mars 1953, un troisième modèle, le modèle connu actuellement (Vignais, 2001). La molécule d'ADN est formée de deux chaînes de nucléotides antiparallèles et qui sont enroulées en une hélice dextrogyre. Ces chaînes comportent quatre bases azotées appariées par des liaisons hydrogènes : A avec T reliés par deux ponts hydrogènes, et C avec G par trois liaisons hydrogènes.

Ce modèle est validé par Rich en 1973 grâce à des preuves de cristallographie directe (Marty, 2003).

L'acceptation de l'ADN comme support de l'hérédité et la découverte de sa structure ont nécessité plus d'un siècle de recherches alliant biologistes, chimistes et physiciens. Aujourd'hui, grâce à eux, on peut dire qu'un gène, porté par un chromosome et présent dans le noyau d'une cellule, est une séquence d'ADN, elle-même étant une succession ordonnée de bases azotées qui est transmise aux descendants et commande la synthèse des protéines (Rumelhard, 1986).

2) Obstacles épistémologiques rencontrés par les chercheurs

Grâce à cette étude historique, nous pouvons remarquer que les chercheurs ont été confrontés à diverses difficultés lors de la construction du modèle contemporain de l'ADN. À partir de ces difficultés nous pouvons construire des obstacles en regroupant les difficultés identiques mais rencontrées à différents moments ou les difficultés proches d'un point de vue biologique. Nous pouvons ensuite décrire les raisons historiques de l'existence de ces obstacles.

Ces obstacles sont nombreux et de natures différentes : social (influence d'un groupe de recherche reconnu), technique (les instruments disponibles ne permettent pas de réaliser toutes les observations), liés à la croyance (idées préconçues sur ce que doit être le support de l'information génétique)...

En accord avec le travail de Fayolle (2009), nous avons choisi de répartir les difficultés liées à la construction du concept de transmission de l'hérédité en quatre catégories d'obstacles :

- Les mutations sont un facteur d'évolution et d'hérédité.
- Un même matériel biologique peut avoir différentes formes.
- Les différents objets biologiques impliqués dans l'hérédité sont liés entre eux.
- L'information génétique est codée.

Ces catégories sont maintenant explicitées ci-dessous.

A. Mutations : facteurs d'évolution et d'hérédité

Quand Darwin présente sa théorie de l'évolution, il déclare que l'évolution est due à des variations dues au hasard, ce qui exclue les mutations à l'origine des variations discontinues des facteurs d'évolution. De plus, pendant très longtemps, les mutations ont été seulement associées aux maladies. Elles ne pouvaient donc pas avoir un rôle dans l'évolution puisqu'elles disparaissaient à la génération suivante ou très rapidement dans les générations suivantes.

Ce n'est que lorsque Morgan établit un lien entre gène et caractère par l'intermédiaire des mutations que les scientifiques découvrent que les mutations ont un rôle dans l'hérédité et donc peuvent être aussi des facteurs d'évolution. À partir de ce moment, les variations discontinues vont être étudiées comme des causes de l'évolution et de l'hérédité.

B. Un même matériel biologique – différentes organisations

Très rapidement lors de la découverte de la notion de transmission de l'hérédité, les chercheurs pensent que les chromosomes jouent un rôle important dans la transmission de l'information génétique. Mais quand ils observent les chromosomes, ils constatent que ceux-ci ne sont pas toujours présents. Ce ne peut donc pas être les chromosomes, les porteurs de l'information génétique. En effet, à l'époque, on pense que le support de l'hérédité doit toujours être visible, à tout moment. Ce n'est pas le cas des chromosomes qui, pendant l'interphase, sont décondensés et ne se présentent plus sous la forme de bâtonnets mais sous la forme de filaments agglomérés composés d'ADN et de protéines : la chromatine.

Au final, il s'agit du même matériel, la chromatine, condensée ou décondensée, et qui reste donc présente tout le temps du cycle cellulaire. Mais cette observation n'a été faite qu'une fois la mitose comprise. Cela a donc retardé l'acceptation des chromosomes (chromatine) comme support de l'hérédité.

C. Liens entre les différents objets biologiques

Les objets biologiques qui interviennent dans la transmission des caractères : cellule, noyau, chromosomes, gènes, acides nucléiques, ADN, ont tous été étudiés séparément par les chercheurs. Il a donc été difficile de faire des liens entre eux. En plus, ils ont été étudiés essentiellement au niveau structural, et pas au niveau fonctionnel, ce qui a compliqué encore plus l'établissement des relations entre ces objets. Ils étaient considérés uniquement comme des supports de l'hérédité, mais sans fonction, les mécanismes étant réservés aux protéines. Ce n'est que lorsque le rôle de l'acide nucléique est reconnu que le paradigme protéique a été dépassé.

Les recherches chimiques vont ensuite permettre de lier gènes et chromosomes par la mise en évidence d'une nature chimique commune. Ensuite, les études par coloration du cycle cellulaire font le lien entre ADN et chromosome. La relation entre ADN et gène n'est réalisée que lorsque le dernier obstacle est levé : la notion de code.

D. Codage de l'information génétique

L'information génétique est organisée en une suite de nucléotides ordonnés sous la forme d'un code. Mais ce code n'est pas apparu tout de suite lors des recherches. Tout d'abord, les chercheurs pensent que la molécule d'ADN est une molécule monotone avec des bases en proportion égale et que c'est une molécule identique pour toutes les espèces. Ensuite, le modèle de motif tétranucléotidique apparaît, ce qui renforce l'idée de molécule monotone. À ce stade de réflexion, l'ADN ne peut donc pas être le support de l'hérédité.

Pourtant, d'autres études démontrent que cette molécule est le support de l'hérédité. Il est donc nécessaire de trouver une explication. Les scientifiques étudient alors plus en détail la nature de cette molécule. C'est en découvrant les lois qui régissent l'organisation des bases (appariement deux par deux, nombre de ponts hydrogènes les reliant) que la notion de code est apparue et a pu expliquer le fait qu'une même molécule, présentant une organisation propre à chaque individu, soit à l'origine d'espèces différentes par interprétation variée du code qu'elle porte.

Aujourd'hui, l'ensemble de ces recherches nous permet d'enseigner l'information génétique et les mécanismes de transmission des caractères. Mais ces connaissances sont encore en évolution comme le démontre les découvertes récentes sur l'épigénétique. Les programmes scolaires vont donc être sujets à des adaptations en relation avec les avancées de la recherche.

II. Analyse du savoir scolaire

1) Analyse des programmes

L'information génétique est une notion transversale des programmes, et principalement de ceux des classes de troisième et de seconde en France. Afin de connaître quelles sont notions que les élèves réalisant notre situation ont déjà rencontrées, nous avons étudié les programmes. Les élèves de notre situation ont suivi les programmes parus en 1998 pour la classe de troisième et en 2001 pour la seconde.

Actuellement, les programmes enseignés ont été réformés. Nous allons les comparer à ceux suivis par les élèves pour constater les évolutions entre les anciens et les nouveaux programmes, comme cela avait déjà été fait avec l'ensemble des programmes de collège par Fuchs-Gallezot et Coquidé (2007).

Dans le tableau ci-dessous, les phrases surlignées en violet correspondent à des reformulations entre les deux versions des programmes, par contre, celles surlignées en jaune ne sont présentes que dans une deux versions. Nous pouvons ainsi constater l'évolution entre les deux.

Programme de troisième :

B.O. 1998[7]	B.O. 2008[8]
Notio`s	
Chaque individu présente les caractères de l'espèce avec des variations qui lui sont propres. C'est le résultat de l'expression de son programme génétique et de l'influence des conditions de vie.	Chaque individu présente les caractères de l'espèce avec des variations qui lui sont propres.
Les caractères qui se retrouvent dans les générations successives sont des caractères héréditaires.	Les caractères qui se retrouvent dans les générations successives sont des caractères héréditaires.
Les conditions de vie peuvent modifier certains caractères. Ces modifications ne sont pas héréditaires.	Les facteurs environnementaux peuvent modifier certains caractères. Ces modifications ne sont pas héréditaires.
Les chromosomes sont le support du programme génétique. Toujours présents dans le noyau, ils sont facilement observables lors de la division cellulaire ;	Les chromosomes présents dans le noyau sont le support de l'information génétique.

[7] Bulletin officiel de l'éducation nationale (1998). *Programme des classes de troisième des collèges*, vol.2, Sciences de la Vie et de la Terre. B.O. Hors-série, n°10, 15 octobre 1998, 115-124.

[8] Bulletin officiel de l'éducation nationale (1998). *Programme des classes de troisième des* Bulletin officiel spécial de l'éducation nationale (2008). *Programmes du collège – Programmes de l'enseignement de sciences de la vie et de la Terre*. B.O. n°6, 28 août 2008.

les êtres humains possèdent 23 paires de chromosomes, l'une d'elles présente des caractéristiques différentes selon le sexe ;	Chaque cellule d'un individu de l'espèce humaine possède 23 paires de chromosomes, l'une d'elles présente des caractéristiques différentes selon le sexe.
un nombre anormal de chromosomes empêche le développement de l'embryon ou entraîne des anomalies chez l'individu concerné.	Un nombre anormal de chromosomes empêche le développement de l'embryon ou entraîne des caractères différents chez l'individu concerné.
Les cellules de l'organisme, à l'exception des gamètes, possèdent les mêmes chromosomes que la cellule-œuf dont elles dérivent par divisions successives (…)	Les cellules de l'organisme, à l'exception des cellules reproductrices, possèdent la même information génétique que la cellule-œuf dont elles proviennent par divisions successives
Les chromosomes portent les gènes, unités d'information génétique qui déterminent les caractères héréditaires.	Chaque chromosome contient de nombreux gènes. Chaque gène est porteur d'une information génétique. Les gènes déterminent les caractères héréditaires.
À un gène correspondent des informations différentes pour un caractères : ce sont ses allèles.	Un gène peut exister sous des versions différentes appelées allèles.
En général, dans une cellule, un gène existe en deux exemplaires, occupant la même position sur chacun des deux chromosomes d'une paire.	
Les cellules possèdent, pour un même gène, soit deux fois le même allèle, soit deux allèles différents. Dans ce dernier cas les deux allèles peuvent s'exprimer ou l'un peut s'exprimer et pas l'autre.	
Chaque cellule possède l'ensemble du programme génétique qui contribue à le rendre unique.	
Chaque individu issu de la reproduction sexuée possède un programme génétique qui contribue à le rendre unique.	Chaque individu issu de la reproduction sexuée est génétiquement unique.
	Chaque chromosome est constitué d'ADN.
	L'ADN est une molécule qui peut se pelotonner lors de la division cellulaire, ce qui rend visibles les chromosomes.
Capacités	
Relier les caractères présentés par un individu à l'existence d'un programme génétique porté par les chromosomes et/ou à l'influence des conditions de vie.	
Distinguer un caractère d'espèce de ses variations individuelles.	
Identifier à propos d'un caractère morphologique ou physiologique l'influence des conditions de vie.	

Utiliser un microscope pour observer des chromosomes.	Effectuer un geste technique en réalisant une observation microscopique au fort grossissement de cellules montrant des chromosomes.
Repérer les particularités d'un caryotype ordonné (chromosomes sexuels, nombre et forme des chromosomes).	
Expliquer verbalement, par un schéma ou par l'utilisation d'une maquette, comment s'effectue la transmission intégrale des chromosomes de la cellule-œuf.	
Etablir la relation entre l'expression d'un caractère et l'information génétique possédée par un individu.	
Expliquer l'originalité de chaque individu par une double intervention du hasard.	
	Formuler des hypothèses quant à la localisation de l'information génétique. Valider ou invalider ces hypothèses à partir de résultats d'expériences.
	Suivre un protocole d'extraction et de coloration de l'ADN des cellules végétales.
	Observer, recenser et organiser des informations pour établir une relation entre les caractères et les chromosomes.
	Formuler des hypothèses sur une relation de cause à effet entre les gènes et les caractères héréditaires.
	Formuler et valider des hypothèses afin d'établir le mécanisme permettant la conservation de l'information génétique au cours des divisions cellulaires.

Tableau 1 : Comparaison des programmes de troisième de 1998 et 2008

Lorsque l'on compare ces programmes, nous pouvons constater la mise en évidence de plusieurs différences. Tout d'abord, dans les nouveaux programmes, nous voyons que le terme ADN est introduit dès la troisième ainsi que le lien avec les chromosomes. On retrouve également une modification de vocabulaire qui consiste à employer toujours le terme « information génétique » et plus une fois « programme génétique » et ensuite « information génétique ». Cela permet de proposer un seul terme aux élèves et de créer moins de confusions.

Programme de seconde :

B.O., 1999[9]	B.O., 2010[10]
Notio`s	
La transgénèse repose sur l'universalité de la molécule d'ADN en tant que support de l'information génétique.	La transgénèse montre que l'information génétique est contenue dans la molécule d'ADN et qu'elle y est inscrite dans un langage universel.
Chaque chromosome contient une molécule d'ADN qui porte de nombreux gènes.	
L'ADN est formé de deux chaines complémentaires (A, T, C, G). La séquence des nucléotides au sein d'un gène constitue un message.	
Les allèles ont pour origine des mutations qui modifient la séquence de l'ADN. Les mutations introduisent une variabilité de l'information génétique. Les conséquences des mutations sont différentes selon qu'elles touchent les cellules somatiques ou germinales.	La variation génétique repose sur la variabilité de la molécule d'ADN (mutation).
	L'universalité du rôle de l'ADN est un indice de la parenté des êtres vivants. Objectifs et mots clés : La double hélice, nucléotide, séquence.
	La diversité des allèles est l'un des aspects de la biodiversité.
	La dérive génétique est une modification aléatoire de la diversité des allèles. Elle se produit de façon plus marquée lorsque l'effectif de la population est faible. La sélection naturelle et la dérive génétique peuvent conduire à l'apparition de nouvelles espèces.
Capacités	
Mise en évidence d'ADN au niveau des chromosomes (Feulgen). Extraction d'ADN. Modèles d'ADN réels ou virtuels.	Manipuler, modéliser, recenser, extraire et organiser des informations pour mettre en évidence l'universalité de l'ADN.

[9]Bulletin officiel de l'éducation nationale (1999). *Programme des lycées*, vol.2, Nouveau programme de Sciences de la Vie et de la Terre. B.O. Hors-série, n°6, 12 août 1999, 25-28.

[10]Bulletin officiel du ministère de l'éducation nationale (2010). *Programme de Sciences de la Vie et de la Terre en seconde générale et technologique*. B.O. spécial, n°4, 29 avril 2010.

Obtention par traitement contrôlé aux UV de mutants de levure reconnaissable par la coloration des colonies ou leur auxotrophie.	
	Mettre en œuvre une méthode (démarche historique et/ou utilisation de logiciel et/ou pratique documentaire) permettant d'approcher la structure de l'ADN et la nature du message codé.
	Manipuler, utiliser un logiciel de modélisation pour comprendre la dérive génétique.
	Extraire et organiser des informations pour relier crises biologiques, dérive génétique et évolution des espèces.

Tableau 2 : Comparaison des programmes de seconde de 1999 et 2010

En classe de seconde, dans les anciens programmes en vigueur avant 2010, l'enseignement de la génétique consistait en une description de l'information génétique portée par l'ADN et formée de quatre bases organisées par paires, reliées par des phosphates et des sucres. On y trouvait également l'enseignement des mutations et des liens biologiques entre les chromosomes, les gènes et l'ADN. Ces liens étaient essentiellement visibles au travers de l'expression : « Chaque chromosome contient une molécule d'ADN qui porte de nombreux gènes. ». Dans les nouveaux programmes, ces liens entre les objets biologiques sont pris en charge dans le programme de troisième et ne sont plus explicités en seconde.

Une nouveauté, dans les programmes de 2010, consiste en l'introduction de la théorie de l'évolution pour amener la dimension population et montrer que les conséquences des mutations ne se vérifient pas uniquement au niveau d'un individu unicellulaire (comme suggéré dans les anciens programmes).

Nous pouvons tout de même remarquer que l'apprentissage de la génétique en troisième et en seconde, quel que soit le programme, est déconnecté de la fonction de l'information génétique même s'il est question de la notion de code. L'étude de cette notion s'intéresse presque exclusivement au tableau du code génétique et à la signification des triplets comme étant des acides aminés. Cela pose des difficultés aux élèves qui ont besoin de tous les éléments pour comprendre cette notion complexe.

Ce sont justement ces éléments que nous allons présenter dans la partie suivante afin de comprendre les concepts en jeu dans la notion de notre étude, les niveaux biologiques et les liens qui les associent.

2) Présentation des connaissances dans des manuels

Nous avons construit cette partie en réalisant un état des lieux et en développant les connaissances enseignées, avant la classe de première, en lien avec la modification de l'information génétique. Ces connaissances ont été identifiées à partir des manuels du collège, du lycée et de l'université ainsi qu'à partir de différentes ressources mises à disposition pour et par les enseignants. Nous avons ainsi repéré différents niveaux et objets

biologiques en lien avec la modification de l'information génétique. Nous avons développé ces connaissances avec un niveau de formulation correspondant à celui du secondaire avant la classe de première.

A. Différents niveaux biologiques

Chacun des objets impliqués en génétique correspond à un niveau biologique différent qui concorde avec un ordre de grandeur (centimètre, millimètre, nanomètre) et une échelle spécifique (macroscopique, microscopique, moléculaire). De plus, ils s'articulent les uns avec les autres selon une organisation particulière. Nous allons partir du plus grand des objets biologiques impliqués pour aller jusqu'au plus petit.

La première échelle biologique est celle du Milieu. Le milieu de vie d'un organisme regroupe l'ensemble des conditions nécessaires à la vie, la survie et la croissance de cet individu et auxquelles il est adapté (température, humidité, pression, eau, nutriments, ensoleillement, latitude, localisation géographique, …). Ces conditions de vie sont aussi appelées facteurs abiotiques ou paramètres environnementaux. Ils correspondent à l'action du non-vivant sur le vivant.

Figure 2 : Un écosystème, ensemble de milieux[11]

Chaque milieu est plus ou moins spécifique d'une population donnée (groupe d'individus de la même espèce vivant dans une même aire géographique et avec les mêmes conditions environnementales), ce qui nous conduit au deuxième niveau d'échelle biologique : l'Organisme.

[11] Tourbière de Longeyroux, Meymac - www.ot-meymac.visite.org

Un organisme est un être vivant organisé, ayant ou pouvant avoir une existence autonome. Ce peut être un individu autotrophe ou hétérotrophe qui tire de son milieu tous les éléments et l'énergie dont il a besoin pour vivre, survivre, croître et se reproduire ou se multiplier. C'est un système que les scientifiques définissent comme ouvert car il échange des matières et de l'énergie avec son environnement. Il peut être unicellulaire (formé d'une seule cellule) ou pluricellulaire. Tout organisme est délimité par une enveloppe protectrice spécifique qui permet les échanges avec le milieu extérieur. Cette enveloppe protège le contenu de l'organisme qui est formé de tout ce qui est nécessaire à la survie et au fonctionnement de l'individu.

[12]

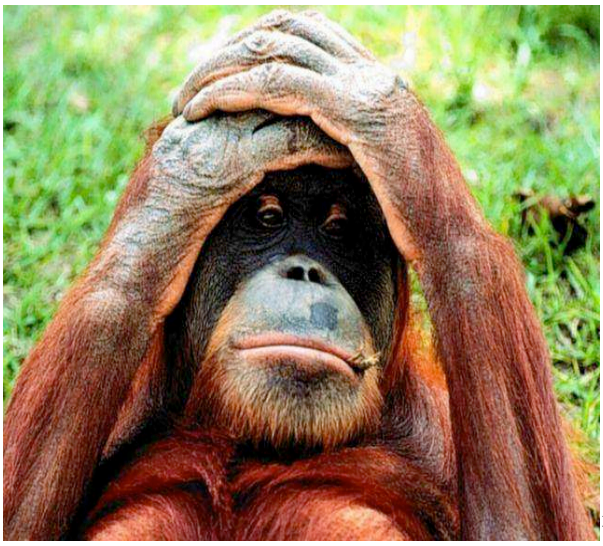

[13]

Figure 3 : Plusieurs individus

Un organisme peut aussi être séparé en différentes parties qui assurent chacune une fonction particulière. Certaines de ces parties sont qualifiées d'organes et correspondent au niveau d'échelle suivant.

Le troisième niveau d'échelle biologique est donc celui de l'Organe. L'organe est une unité fonctionnelle spécialisée, formée d'un arrangement particulier de tissus formés de cellules différenciées et protégée par une enveloppe. Cette enveloppe permet la communication entre l'intérieur et l'extérieur de l'organe, avec d'autres organes, avec le reste de l'organisme…

Le contenu assure le fonctionnement de l'organe lui-même et permet à celui-ci de prendre en charge une fonction particulière dans l'organisme.

[12] http://environnement.ecoles.free.fr/macro_photos_fleurs_non_identifies.htm
[13] http://35heures.blog.lemonde.fr/2005/09/19/2005_09_le_thorme_du_si/

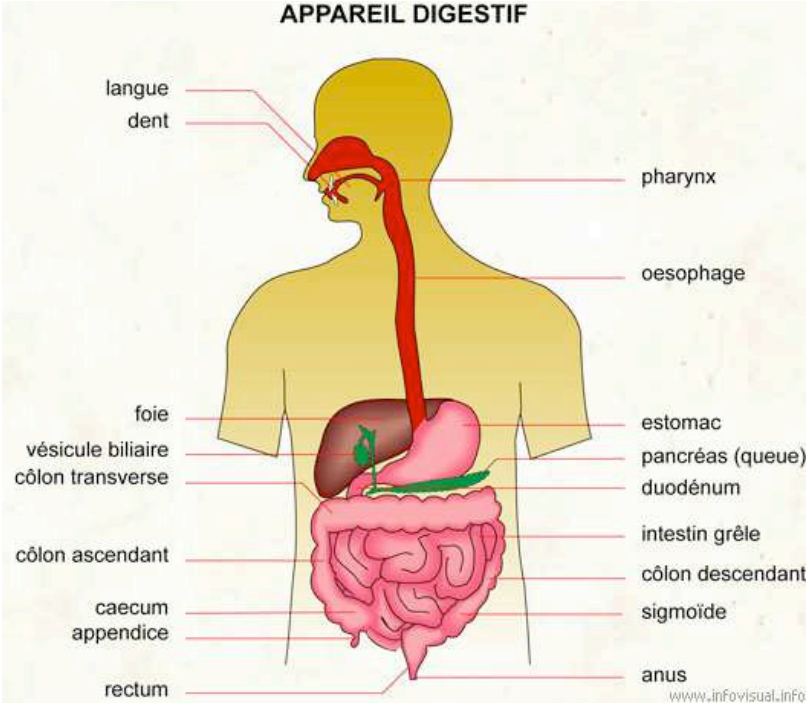

[14]

Figure 4 : Plusieurs organes de l'appareil digestif

Un organe est formé de nombreuses entités plus petites qui sont les cellules.

Parmi les cellules, il existe les procaryotes et les eucaryotes. Les procaryotes font de 1 à 10µm et se retrouvent chez les Bactéries et les Archées. Quant aux eucaryotes, ce sont les protistes, les champignons, les animaux et les végétaux qui en sont formés et ces cellules font de 10 à 100 µm. Parmi les eucaryotes, il existe deux types de cellules : les cellules animales et les cellules végétales. Les cellules ont un caractère universel mais elles peuvent être différenciées par leur forme, leur taille, leur fonction. Elles sont alors spécialisées. Elles ont donc des caractéristiques et des fonctions différentes mais également, de nombreux points communs. Dans cette partie, nous nous attacherons à décrire essentiellement les points communs.

La cellule est l'unité structurale et fonctionnelle de base de tous les êtres vivants. Elle peut avoir une existence autonome chez les êtres unicellulaires car elle utilise des nutriments, produit de l'énergie, échange des informations avec son entourage (autres cellules ou milieu extérieur), se multiplie et meurt. Elle produit tous les processus et toutes les substances nécessaires à sa vie par l'intermédiaire de réactions chimiques. La cellule, qui ne fait que quelques µm de long, peut être, au sein d'un organisme pluricellulaire, différenciée et assurer une fonction particulière, ce qui aura une influence sur sa forme, sa fonction, sa production…

La membrane cellulaire, appelée aussi membrane plasmique, sert de protection à la cellule, est indispensable à sa survie et permet les échanges et la communication entre l'intérieur et l'extérieur de cette cellule. Elle est formée d'une bicouche lipidique maintenue par des sucres et des protéines, tous indispensables à la protection et la perméabilité de la cellule.

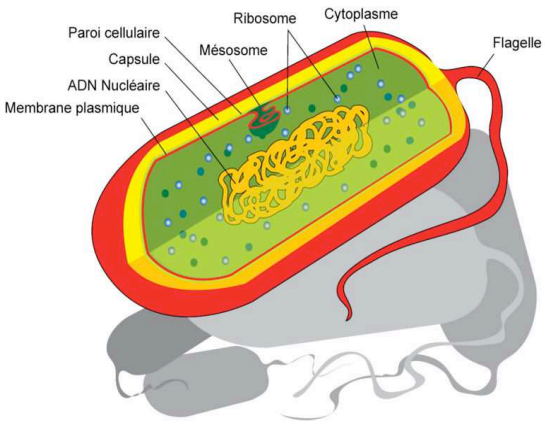
Le contenu cellulaire comprend tout ce qui est indispensable à la survie et au fonctionnement de la cellule et peut être transféré d'une cellule à une autre cellule de même type. Ce milieu intérieur est formé d'un milieu liquide appelé cytoplasme et dans lequel

[14] http://www.infovisual.info/03/057_fr.html

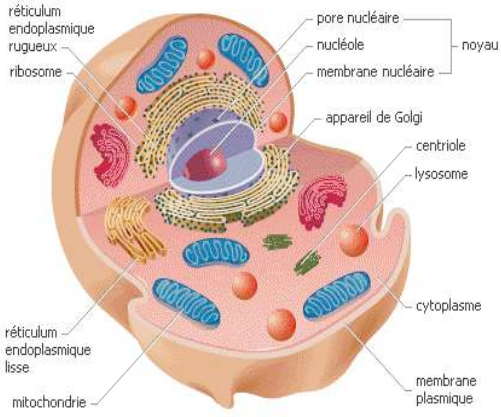
« baignent » les organites qui prennent chacun en charge une fonction nécessaire à la vie de la cellule.

Les cellules procaryotes sont qualifiées de cellules sans "noyau vrai" car leur matériel génétique « baigne » dans le cytoplasme et n'est pas réellement séparé des autres constituants cellulaires par une membrane.

Chez les eucaryotes, cette membrane, à l'intérieur de la cellule, est appelée membrane nucléaire et délimite le noyau qui rassemble donc le matériel génétique.



15



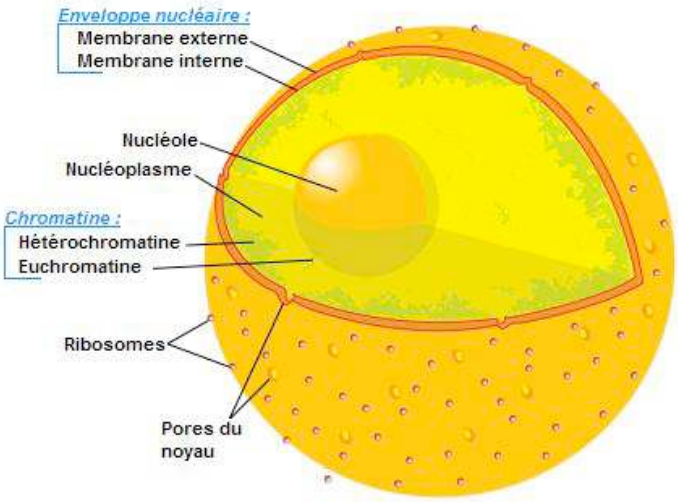
16

Figure 5 : Une cellule procaryote et une cellule eucaryote

Parmi les organites de la cellule, on retrouve, par exemple, les mitochondries, le réticulum et surtout le noyau, qui contient l'information génétique.

Le cinquième niveau d'échelle est celui du noyau. Il est l'organite contenant la majorité de l'information génétique chez les cellules eucaryotes. Il mesure en moyenne 5µm de diamètre et contient toutes les informations nécessaires à la reproduction et à la division de la cellule. Il contrôle également l'ensemble des réactions chimiques du cytoplasme et est transférable d'une cellule à une autre. Ce noyau est protégé par l'enveloppe nucléaire qui le sépare du cytoplasme mais autorise la communication et les échanges avec celui-ci. L'intérieur du noyau contient le nucléole, centre de production des ARN, qui « baigne » dans le nucléoplasme, milieu liquide proche du cytoplasme.

[15] http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:S%C3%A9lection/Microbiologie
[16] http://images.encarta.msn.com/xrefmedia/fencmed/targets/illus/ilt/T059292A.gif

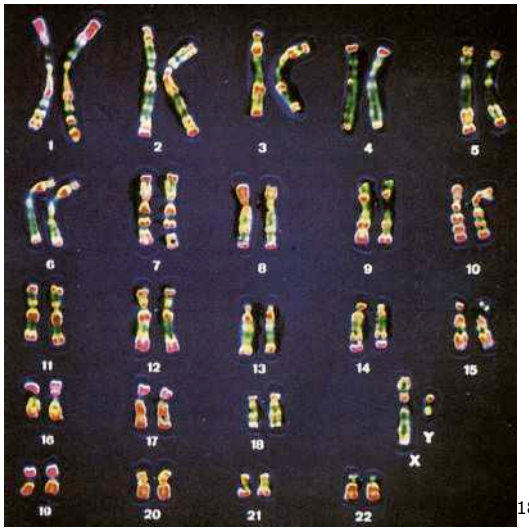


[17]

Figure 6 : Un noyau

Le matériel génétique présent dans le noyau peut être étudié par l'intermédiaire d'une organisation particulière : le caryotype.

Le caryotype constitue le sixième niveau et possède un statut un peu différent des autres. En effet, le caryotype n'existe pas dans la nature car c'est une carte reconstruite par les généticiens, dans un but principalement préventif lors de diagnostics génétiques. La modification ne concernera donc pas le caryotype mais ce qui le compose : les chromosomes. Un caryotype correspond à un classement numéroté des chromosomes organisés par paires homologues et par ordre décroissant de taille. Il est spécifique de chaque individu et comprend des chromosomes aux formes, tailles et nombres particuliers en fonction de chaque espèce.



[18]

Figure 7 : Un caryotype humain

[17] http://fr.wikibooks.org/wiki/Biologie_cellulaire/Noyau_cellulaire
[18] http://www.svtadam.com/3eme.htm

Les chromosomes constituent le septième niveau d'échelle lorsqu'ils sont considérés individuellement.

Un chromosome est un élément microscopique présent dans le noyau des cellules, d'une taille de 1 à 5 µm (souvent proportionnel au nombre de chromosomes présents dans le noyau et à la taille du noyau). C'est une forme super enroulée et condensée de fibres de chromatine, elle-même composée d'ADN et de protéine. Il existe deux types de chromosomes : les gonosomes ou chromosomes sexuels (X et Y chez de nombreuses espèces animales) et les autosomes pour les autres chromosomes. Le chromosome est transmis des cellules mères aux cellules filles lors de la méiose ou de la mitose et est transférable entre individus de la même espèce. Tous les individus d'une même espèce ont le même nombre défini de chromosomes. Les chromosomes sont présents dans les noyaux des cellules eucaryotes et correspondent à de la chromatine décondensée lors de l'interphase puis condensée dans les autres phases de la mitose et de la méiose. Les chromosomes sont associés par paires, un chromosome provenant de la mère, un autre du père lors de la fécondation.

Un chromosome est le support d'informations particulières qui permettent de transmettre les caractères héréditaires d'un individu à ses descendants. Il est également indispensable car il permet à la cellule de conserver son patrimoine génétique lors de sa division. Ils ressemblent, en fonction de la phase du cycle cellulaire à laquelle ils sont observés, à des filaments fins (chromatine), à des bâtonnets (chromosome à une chromatide), à une croix (chromosome à deux chromatides sœurs avec des copies identiques de la molécule d'ADN initiale). La forme la plus couramment représentée est le X qui est formé par les quatre bras du chromosome réunis au niveau du centromère. Deux bras d'un même côté forment une chromatide.

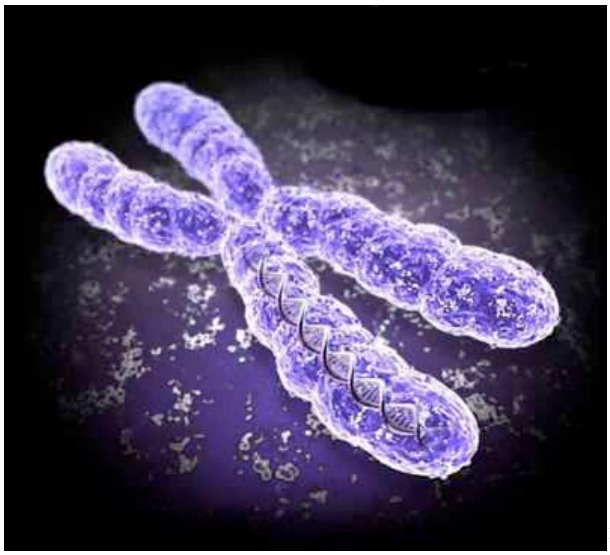

[19]

Figure 8 : Un chromosome en X

Les chromosomes portent les gènes. Les gènes sont à la fois une unité physique et une unité d'information dont on peut mettre en évidence le résultat par la transcription. Les gènes constituent le niveau suivant : le niveau huit.

Nous allons tenté de donner une définition du gène bien que, comme le souligne Khattech et Orange (2005) « Les travaux récents ont montré l'impossibilité de définir la fonction du gène, puisque le produit de chaque gène participe à de multiples processus dans

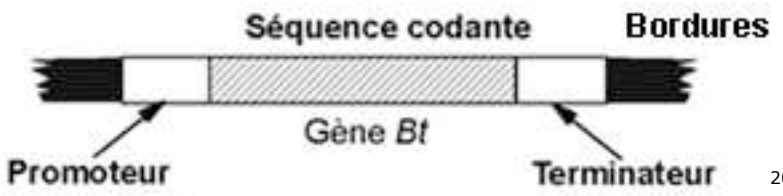
[19] http://lewebpedagogique.com/michelsvt/?attachment_id=10122

l'organisme, tout en étant associé, lors de la mise œuvre des processus, à de multiples autres gènes. ». Chaque gène correspond à une protéine, un peptide ou une enzyme et est à une succession de nucléotides. Un gène porte une unité d'information génétique, qui est transcrite et traduite en une séquence d'acide aminés et qui représente le plan de fabrication d'une protéine. C'est le cumul de plusieurs protéines et enzymes qui va produire un caractère chez un individu. Les gènes sont transmis de générations en générations par les cellules sexuelles. Un même gène peut produire des effets phénotypiques différents, c'est la pléiotropie. Il présente donc plusieurs valeurs, ces différentes valeurs sont appelées allèles.

Comme les chromosomes sont appariés, il y a deux allèles d'un même gène dans une cellule. Ces deux allèles peuvent être identiques ou différents. C'est l'association des deux allèles d'un individu qui va produire le caractère observé au niveau de l'organisme.

Dans le cadre scolaire de la troisième et de la seconde, on peut considérer que si les deux allèles sont différents, l'expression dans le phénotype peut varier. L'allèle peut être dominant, il s'exprimera alors à chaque fois qu'il est présent, que l'autre allèle soit identique ou non. S'il est récessif, il est nécessaire que les deux allèles soient identiques pour observer ce caractère chez un individu. Il existe aussi des allèles co-dominants : si les deux allèles sont différents et co-dominants, les deux versions vont s'exprimer au niveau de l'individu et ce de façon indépendante. Ce mode d'expression des gènes est le plus courant, mais ce n'est pas le seul. Il existe également d'autres types de gènes qui fonctionnent différemment, comme par exemple les gènes homéotiques, les gènes suppresseurs de tumeurs (p53), les gènes de segmentations… L'étude des gènes a apporté des informations sur le codage des gènes, certains sont codants, comme le gène de la couleur des yeux, mais pour la grande majorité ils ne sont pas codant et d'autres sont codants seulement dans certaines conditions, comme les cancers par exemple. Chez un même gène, on retrouve également des parties non codantes (les introns).

Un gène n'est pas une entité à part entière visible mais, sous le terme « gène », sont désignés, en plus des segments codants pour un polypeptide, le promoteur du gène ainsi que certaines régions régulatrices comme la terminaison. Un gène peut alors être représenté comme suit : un segment composé de trois parties, toutes nécessaires à sa lecture et à celle de l'information qu'il porte. La première est le promoteur, qui déclenche la lecture, vient ensuite le corps du gène qui contient l'information, à proprement parler, portée par le gène et pour finir, la terminaison qui indique que la lecture est finie (Campbell et Reece, 2004 p. 334-349).



[20]

Figure 9: Un gène avec promoteur, corps et terminaison

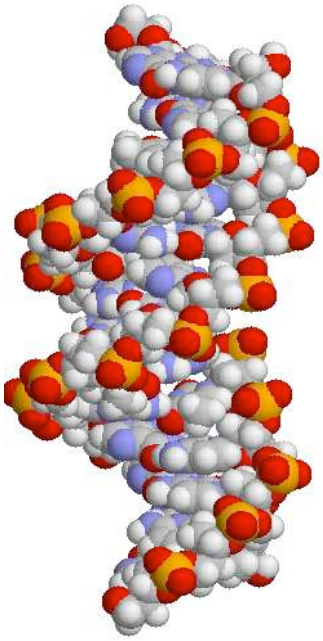
Si l'on regarde plus en détail ce segment, on constate que le gène peut être aussi défini comme une séquence de nucléotides.

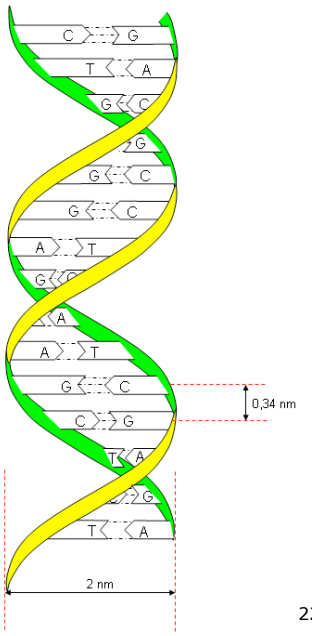
Un gène est dans ce cas « une unité d'information génétique située sur les chromosomes et constituée d'une séquence spécifique de nucléotides dans l'ADN. » (Campbell et Reece, 2004 p.G-17) « il code pour une chaine polypeptidique spécifique » (Ibidem, p.349).

[20] http://terresacree.org/canon.htm

L'ADN, le neuvième niveau, ressemble à une échelle à barreaux enroulée sur elle-même pour former une double hélice dextrogyre. Elle a un diamètre de 2 nm de large.

L'ADN est constitué d'une succession ordonnée de nucléotides qui sont tous organisés de la même façon. Sur l'extérieur de la molécule, on trouve le sucre (désoxyribose) et le phosphate et sur l'intérieur la base. Les bases sont au nombre de quatre et sont appelées : Adénine (A), Thymine (T), Guanine (G), et Cytosine (C). Ces bases peuvent être différenciées chimiquement en deux groupes : les purines (A et C) et les pyrimidines (T et G). Ces bases sont appariées deux à deux grâce à des liaisons hydrogènes : A et T sont associées par deux liaisons et, C et G par trois liaisons. L'écart entre deux bases sur un même brin est de 0,34 nm.


[21]



[22]

Figure 10 : Molécule d'ADN

La succession des bases, des phosphates et des sucres forme un brin d'ADN. Les brins sont au nombre de deux (codant et non-codant). L'ADN est une molécule présente dans toutes les cellules vivantes et correspond effectivement au support de l'hérédité, de l'information génétique. Il est transférable à tous les êtres vivants. L'ADN regroupe l'ensemble des informations nécessaires au développement d'un organisme.

La succession ordonnée des bases forme un code qui correspond à l'information génétique. Trois bases successives dans l'ADN codent pour un acide aminé particulier et la succession de ces acides aminés forme une protéine. On peut retrouver cette succession d'acides aminés grâce au tableau du code génétique.

[21] © Accelerys

[22] http://www.ac-grenoble.fr/svt/log/seconde/1ADNbis/2IIIA_ch.htm

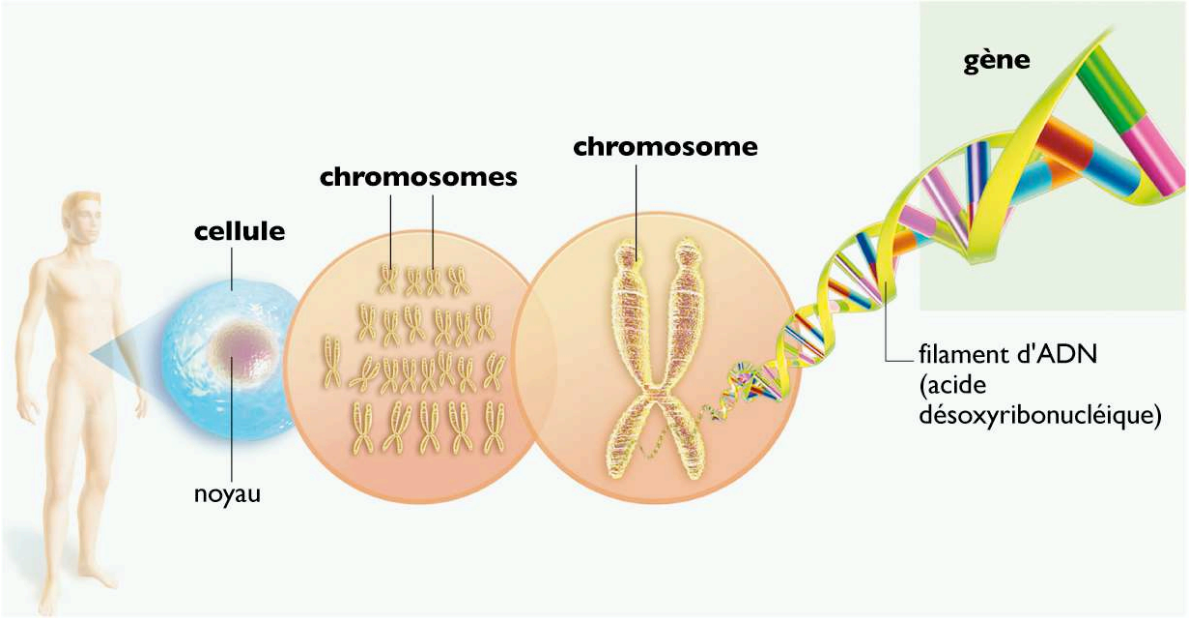
Première lettre		Deuxième lettre: U		C		A		G		Troisième lettre
	U	UUU	Phénil-alanine	UCU	sérine	UAU	tyrosine	UGU	cystéine	U
		UUC		UCC		UAC		UGC		C
		UUA	leucine	UCA		UAA	codons stop	UGA	codon stop	A
		UUG		UCG		UAG		UGG	tryptophane	G
	C	CUU	leucine	CCU	proline	CAU	histidine	CGU	arginine	U
		CUC		CCC		CAC		CGC		C
		CUA		CCA		CAA	glutamine	CGA		A
		CUG		CCG		CAG		CGG		G
	A	AUU	isoleucine	ACU	thréonine	AAU	asparagine	AGU	sérine	U
		AUC		ACC		AAC		AGC		C
		AUA		ACA		AAA	lysine	AGA	arginine	A
		AUG	méthionine	ACG		AAG		AGG		G
	G	GUU	valine	GCU	alanine	GAU	acide aspartique	GGU	glycine	U
		GUC		GCC		GAC		GGC		C
		GUA		GCA		GAA	acide glutamique	GGA		A
		GUG		GCG		GAG		GGG		G

[23]

Figure 11 : Tableau du code génétique

Le code génétique est universel. On peut remarquer qu'un même acide aminé correspond à plusieurs triplets de bases, c'est la redondance génétique. Une séquence particulière de nucléotides code toujours pour la même information, quel que soit l'organisme dans lequel elle se trouve. C'est la différence dans l'organisation des séquences de nucléotides et leur expression qui différencient les êtres vivants.

L'ensemble de ces objets intervient lors de la transmission de l'hérédité et comme le suggèrent les ordres de grandeur, ils sont tous emboîtés les uns dans les autres de l'individu jusqu'à l'ADN, d'une échelle macroscopique à une échelle moléculaire.



[24]

Figure 12 : Organisation biologique générale

[23] http://www.svt-biologie-premiere.bacdefrancais.net/biologie_4.php
[24] © Michel Saemann (illustrateur) ; http://www.larousse.fr/encyclopedie/article/g%C3%A8ne/11018330

Maintenant que nous avons défini et replacé chacun des objets biologiques présents en génétique dans l'organisation biologique générale, nous pouvons nous intéresser plus précisément à l'objet de notre étude : la modification de l'information génétique.

B. Modifications de l'information génétique : le cas des mutations génétiques

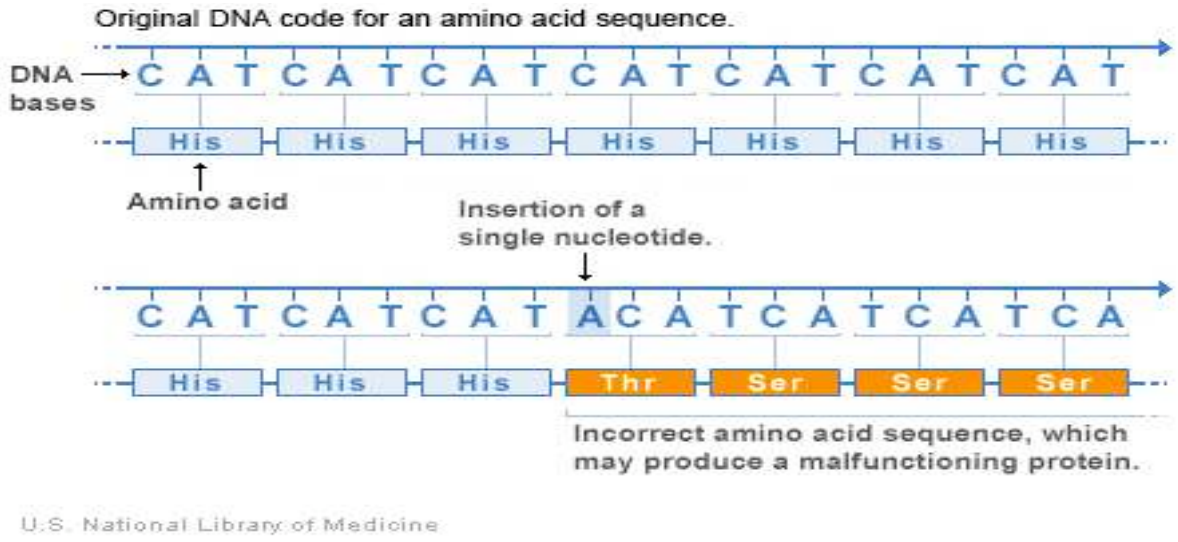
Certaines modifications de l'information génétique sont caractérisées de mutations génétiques si elles sont irréversibles. Ce sont des modifications, des altérations du matériel génétique d'une cellule. Elles sont appelées mutations ponctuelles car elles ne portent que sur un ou deux nucléotides d'un gène en même temps contrairement aux mutations chromosomiques qui portent sur les chromosomes.

Ce sont des « modifications chimiques touchant une ou plusieurs paires de bases d'un gène. » (Campbell et Reece, 2004, p.346).

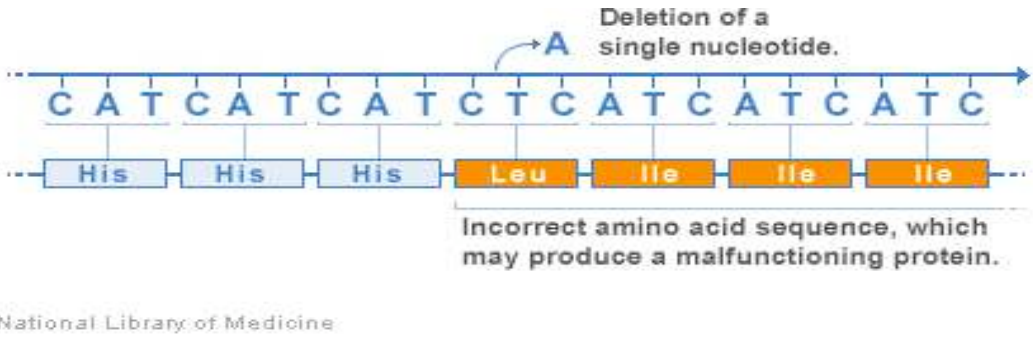
Ces modifications de la succession des nucléotides peuvent être de plusieurs types (Campbell et Reece, 2004, p. 347-348) :

- Insertion : ajout d'une ou plusieurs base(s) (nucléotide) et de son vis-à-vis sur le brin d'ADN complémentaire.
- Délétion : perte d'une ou plusieurs paire(s) de bases dans la chaîne d'ADN.
- Duplication : reproduction d'une ou plusieurs paire(s) de bases dans la chaîne d'ADN.
- Substitution / échange : remplacement d'une ou plusieurs paire(s) de bases dans la chaine d'ADN par une paire de bases différentes.

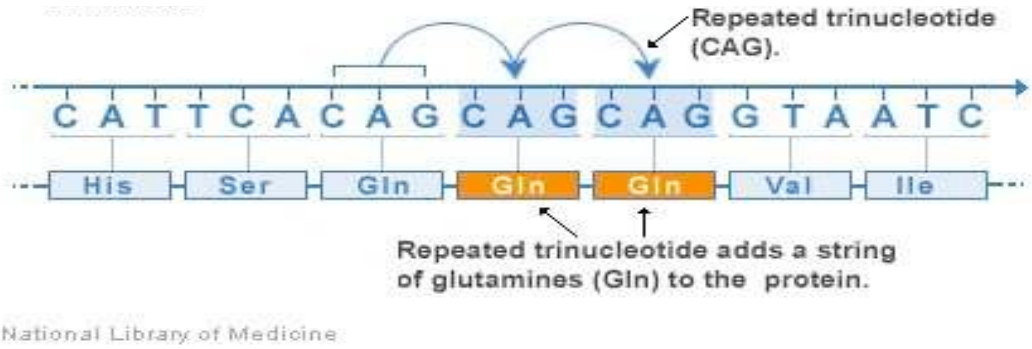
Insertion



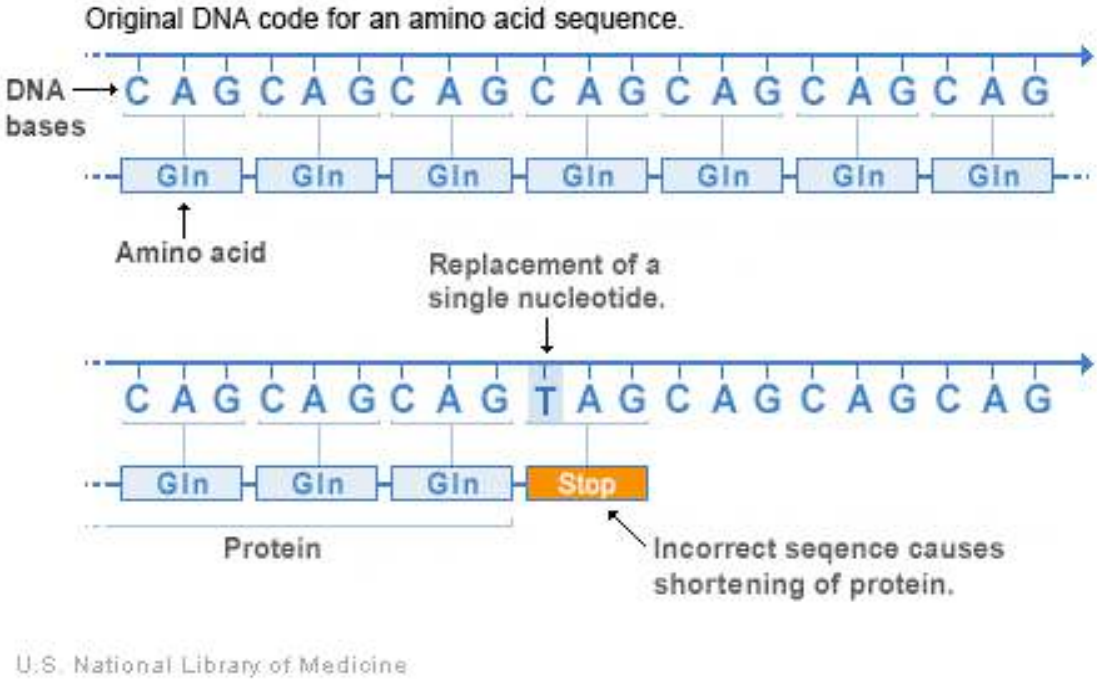
Délétion



Duplication



Substitution



[25]

Figure 13 : Différents types de mutations

Une mutation n'est transmise à la descendance que si elle touche une cellule reproductrice.

[25] http://ghr.nlm.nih.gov/handbook/illustrations/frameshift

> « Si une mutation ponctuelle apparaît dans un gamète ou dans une cellule productrice de gamètes, elle peut être transmise à la descendance immédiate et aux générations suivantes. » (Campbell et Reece, 2004, p.346).

Ceci est valable seulement pour les êtres eucaryotes multicellulaires. Pour les êtres unicellulaires (eucaryotes ou procaryotes), la mutation est automatiquement transmise à la descendance puisqu'elle touche l'ensemble de l'individu.

Les mutations génétiques ne sont pas les seules modifications de l'information génétique qui existent. Les modifications non-spontanées et réalisées par l'intervention de l'être humain, comme la création d'OGM, le clonage (dont nous parlons dans la partie sur l'analyse du problème biologique) sont également des modifications ou des manipulations de l'information génétique, ou des modifications de l'expression des gènes.

L'ensemble de ces connaissances est à l'origine de nombreuses difficultés de la part des élèves comme nous pouvons le voir dans plusieurs études internationales étudiées dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Analyse des difficultés d'apprentissage du concept

I. Le domaine de la génétique est difficile pour les élèves

L'analyse des difficultés des élèves lors de l'apprentissage de la génétique a fait l'objet de plusieurs études menées ces 30 dernières années auprès d'élèves de la même tranche d'âge (16-19 ans).

Johnstone et Mahmoud (1980) et Bahar, Johnstone et Hansell (1999) ont cherché à connaître les sujets biologiques perçus comme les plus difficiles par les élèves anglais et écossais.

L'objectif de Johnstone et Mahmoud, après l'identification des difficultés était, dans un deuxième temps, d'adapter les programmes d'enseignement en Grande-Bretagne pour faciliter le dépassement de ces difficultés. Ils ont mené cette recherche auprès de 166 élèves en fin de lycée, 167 étudiants en première année d'université (filière biologie) et 50 enseignants de Grande-Bretagne. Un questionnaire était proposé à chaque participant qui devait, pour 15 thèmes (« topics ») différents de la biologie, cocher la case correspondant à son ressenti et selon l'échelle suivante :

- Facile, j'ai compris dès la première fois.
- Moyen, j'ai travaillé mais j'ai compris.
- Difficile, j'ai travaillé et je n'ai toujours pas compris.
- Je n'ai jamais étudié ce thème.

Les réponses ont été transformées en indice de difficulté selon la formule suivante :

$$\frac{\text{(Nombre d'élèves ayant répondu « difficile »)} * 100}{\text{(Nombre total d'élèves)} - \text{(Nombre d'élèves qui n'ont jamais étudié la notion)}}$$

À partir de ce calcul d'indice, les thèmes ont été classés du plus (1) au moins difficile (15). Johnstone a ainsi constaté que la génétique était classée 3ème par les élèves et les étudiants et 5ème par les enseignants. Ces résultats ont été comparés avec le rapport réalisé, comme chaque année, par l'inspection générale du Royaume-Uni (the Examination Board) qui classe également la génétique en 3ème position parmi les sujets où les candidats ont le plus de difficultés lors des examens.

Dans une étude plus récente, Bahar, Johnstone et Hansell (1999) ont utilisé le même questionnaire avec le même calcul d'indice auprès de 207 étudiants écossais en première année d'université (filière biologie). Leur objectif était de spécifier les domaines des « topics » (thèmes) posant des difficultés. Ils ont étendu la liste des "topics" de 15 à 36 items à classer. Grâce à cette étude, ils ont ainsi constaté que parmi les dix thèmes classés par les étudiants comme étant les plus difficiles, six concernent la génétique :

> « Monohybrid and dihybrid crosses and linkages (1), Genetic engineering (2), Genetic control of development and metabolic processes (3), Meiosis (4), Gametes, alleles and genes (6), Mutation (10) » [Croisements mono et dihybrides (1), Génie génétique (2), Contrôle génétique du développement et processus métaboliques (3), Méiose (4), Gamètes, allèles et gènes (6), Mutation (10)] (Bahar, 1999).

Ces études montrent donc que la génétique en général dont certains sujets en particulier, est un domaine qui semble aussi difficile à apprendre qu'à enseigner.

II. Difficultés liées aux différents niveaux biologiques mis en jeu …

Bahar, Johnstone et Hansell (1999) expliquent ces difficultés par plusieurs raisons :

- Le fait d'un vocabulaire étendu et complexe,
- L'intervention, souvent, de modèles mathématiques (calcul de probabilité de présence de caractères lors de l'étude de croisements et de lignées, calculs d'homologie lors de comparaison de séquences de gènes),
- Des sujets et des termes utilisés qui paraissent identiques, mais sont, en fait, différents (méiose, mitose) et surtout
- **L'existence de notions de génétique sur plusieurs niveaux biologiques.**

Le dernier point a particulièrement retenu notre attention : l'existence de notions de génétique à différents niveaux biologiques et les implications qu'elle entraîne sur l'apprentissage. Nous avons décidé d'axer notre étude sur ce point et de le développer.

Bahar détermine une organisation de ces niveaux selon la perception sensorielle qu'en ont les élèves et le degré d'abstraction qu'ils doivent adopter pour travailler à tel ou tel niveau. Il dégage trois niveaux : Macro, Sub-micro et Symbolique, qu'il explique de la façon suivante :

> « Observations of morphological characteristics of living things such as flowers or insects, from the MACRO and are accessible to the senses. The appeal to genes, alleles and so on to explain the MACRO takes students into the SUB-MICRO, which is not directly accessible to the senses. These are then represented and manipulated by mathematical devices which are SYMBOLIC of what is happening at the SUB-MICRO, and giving rise to the MACRO. » [Les observations des caractères morphologiques des choses vivantes comme les fleurs ou les insectes appartiennent au niveau macro et sont accessibles par les sens. L'intérêt des gènes, des allèles et autres objets qui expliquent le macro amène les étudiants au niveau sub-micro, qui n'est pas directement accessible par les sens. Ils sont ensuite représentés et manipulés par des outils mathématiques qui traduisent au niveau symbolique ce qui se passe au niveau sub-micro et mettent en évidence le niveau macro.] (Bahar, Johnstone et Hansell, 1999).

Ces trois niveaux correspondent à des approches différentes de la génétique : le niveau phénotypique pour la catégorie Macro, le niveau du gène pour le Sub-micro et le niveau mathématique (distance entre gènes, calculs de probabilités de présence d'un gène...) pour le Symbolique.

Ces différents niveaux biologiques ainsi que leurs relations en génétique ont aussi été l'objet d'une étude menée par Marbach-Ad et Stavy (2000). Dans leur recherche, ils analysent les

explications données par des élèves israéliens de lycée sur la transmission de l'information génétique à partir d'un questionnaire écrit regroupant plusieurs exercices sur la transmission des caractères génétiques et dont un exemple est présent ci-dessous. C'est la première question du questionnaire, qui en comporte trois pour le niveau 9th :

> « Cats usually have five digits on each paw. Omer has a cat with six digits. Omer's cat gave birth to two kittens who also had six digits. How can you explain this? Was something transmitted from the mother to the kittens? If so, what is it? » [Les chats ont normalement cinq doigts à chaque patte. Omer a un chat qui a six doigts. Le chat d'Omer donne naissance à deux chatons qui ont chacun six doigts. Comment expliquez-vous ce phénomène ? Est-ce que quelque chose est transmis de la mère aux chatons ? Si oui, qu'est-ce que c'est ?] (Marbach-Ad et Stavy, 2000).

Marbach-Ad et Stavy identifient de nouveau les niveaux biologiques comme étant la source des difficultés des élèves lors de l'apprentissage de la génétique au lycée. Les élèves du niveau 9th (14-15 ans) ont des difficultés à exprimer des explications d'un niveau micro pour expliquer ce qui se passe au niveau macro. Marbach-Ad et Stavy réalisent, eux aussi, une organisation de ces niveaux mais en s'appuyant, en premier lieu, sur la hiérarchie biologique. Ils font ressortir trois catégories : Macroscopique (organisme), Microscopique (cellule) et Moléculaire (molécule).

La catégorie macroscopique correspond au niveau de l'organisme. Pour les élèves :

> « By manipulating an entire plant or animal, all their senses can be used in observation. » [Par la manipulation d'une plante ou d'un animal entier, tous leurs (ceux des élèves) sens sont utilisés dans l'observation.] (Ibidem, 2000).

La catégorie microscopique est définie par le niveau de la cellule.

> « At this level no direct experience is possible through touching objects. The microscope is positioned between the object and the observer which makes even visual observation considerably restricted. » [À ce niveau, il n'existe pas d'expérience qui permette de toucher directement les objets. Le microscope, placé entre l'objet et l'observateur, permet des observations mais très restreintes.] (Ibid.).

La catégorie moléculaire se rapporte au niveau des molécules.

> « Biochemical structures are not directly visible at all in living organisms. (…) Most molecular 'objects' cannot be observed even indirectly, and must be imagined by students. » [Les structures biochimiques ne sont pas directement visibles dans les organismes vivants (…) beaucoup d'objets moléculaires ne peuvent même pas être observés indirectement, ils doivent être imaginés par les élèves.] (Ibid.).

Il obtient ainsi une classification qui suit l'organisation biologique mais comme Bahar, il ajoute à sa classification une dimension sensorielle, et différencie ces catégories par la perception qu'en ont les élèves : manipulable pour le Macroscopique, observable pour le Microscopique et imaginable pour le Moléculaire.

Marbach-Ad insiste sur le fait que les élèves n'arrivent pas à lier les connaissances des catégories Microscopique et Moléculaire aux observations au niveau Macroscopique, ou font des erreurs lorsqu'ils essayent. Cette difficulté à lier les divers niveaux impliqués en génétique est aussi due, selon lui, au fait que ces niveaux sont enseignés séparément dans le temps, dans des classes différentes (3ème, 2nde en cursus général en France), et dans des matières différentes (biologie et chimie pour le niveau moléculaire).

Duncan et Reiser (2007) retrouvent également ces difficultés liées aux différentes échelles biologiques dans leur étude sur les conceptions de lycéens américains à propos des gènes et de leur rôle par rapport à la synthèse des protéines. Les élèves ont également des difficultés

à raisonner à différents niveaux biologiques. Les auteurs remarquent aussi que les élèves ont des difficultés à appréhender des phénomènes génétiques qui leur semblent invisibles et inaccessibles, qu'ils ne peuvent expérimenter directement. Un autre problème est l'habitude de l'utilisation d'analogies en sciences pour expliquer les phénomènes. Ainsi, les élèves en viennent à attribuer au noyau une fonction équivalente à celle du cerveau, mais au niveau de la cellule. Duncan et Reiser ont obtenu ces résultats par l'intermédiaire de questionnaires et d'interviews proposés aux élèves avant et après l'enseignement de génétique. Le questionnaire est formé à la fois de questions ouvertes :

> « What are genes and what do they do in the body? » [Que sont les gènes et que font-ils dans le corps ?] (Duncan et Reiser, 2007).

et de questions à choix multiples :

> « Proteins are: a) Bigger than cells. b) Bigger than the nucleus. c) Bigger than genes. d) Bigger than amino acids. e) Other: » [Les protéines sont : a) Plus grosses que les cellules. b) Plus grosses que le noyau. c) Plus grosses que les gènes. d) Plus grosses que les acides aminés. e) Autre :] (Ibid.).

Les interviews, quant à elles, s'appuyaient sur des questions posées à l'élève à partir d'exemples concrets de maladies génétiques, proposés par le chercheur ou par l'élève lui-même.

> « Task III. Ask students to pick a genetic disease they know a bit about. Ask students the following questions about the genetic disease they chose:
>
> What are the symptoms of this disease?
>
> Why do we say that it is genetic?
>
> How is it caused? (Press students to give detailed explanations). If students mention genes ask:
>
> How can a gene cause this disease?
>
> Do normal people have this gene?
>
> How is this different from being sick with Anthrax or the Flu? »
>
> [Tâche III. Demander aux élèves de choisir une maladie génétique qu'ils connaissent. Poser aux élèves les questions suivantes à propose de la maladie génétique qu'ils ont choisi :
>
> Quels sont les symptômes de cette maladie ?
>
> Pourquoi dites-vous que c'est une maladie génétique ?
>
> À quoi est-elle due ? (Obliger les élèves à donner des explications détaillées). Si les élèves mentionnent les gènes, demander :
>
> Comment un gène peut-il causer cette maladie ?
>
> Est-ce que les personnes normales ont ce gène ?
>
> Quelle est la différence entre être malade à cause de l'Anthrax ou de la grippe ?] (Ibid.).

À partir des résultats de ces deux situations, Duncan et Reiser expliquent qu'il existe un manque de corrélation et de liens entre les différents niveaux biologiques.

En effet, dans leur étude, ils ne montrent pas seulement que les niveaux posent problème. Selon eux, pour les élèves, chaque niveau existe indépendamment des autres et contient du matériel biologique bien défini et différencié. Par contre, ce qui manque aux élèves lorsqu'ils apprennent la génétique et plus particulièrement l'information génétique, ce sont les articulations entre les niveaux, et au sein d'un même niveau, les articulations entre la nature et la fonction des objets biologiques. Plus précisément, l'articulation nécessaire aux élèves pour comprendre l'information génétique, est le lien entre les niveaux physiques et le niveau information :

> « An information level (containing the genetic information) and a hierarchically organized physical level. » [Un niveau d'information (qui contient l'information génétique) et un niveau physique organisé hiérarchiquement] (Ibid.).

Duncan et Reiser (2007) montrent que les liens entre les niveaux information et physique sont au cœur des difficultés des élèves par rapport à l'apprentissage de la génétique moléculaire. En effet, on a affaire à un système hiérarchiquement hybride qui contient des niveaux ontologiques différents : information et physique. Ils montrent aussi que les élèves doivent passer de l'idée que les gènes sont des particules passives à des séquences produisant des instructions. Enfin ils affirment que l'enseignement aide les élèves à comprendre que les gènes sont de l'information, mais ça n'implique pas la compréhension du contenu et du rôle de cette information pour la synthèse des protéines.

Pour Duncan et Reiser, ce lien peut être fait par l'étude de la synthèse des protéines. Mais c'est un sujet qui n'est étudié que lors d'études ultérieures en biologie et qui manque néanmoins pour la compréhension de l'information génétique dès le début de son enseignement.

Ces difficultés du domaine génétique décliné à différents niveaux biologiques et l'absence de liaisons entre les niveaux lors de l'enseignement et lors de l'apprentissage des élèves, se retrouvent à tous les degrés scolaires. Cette difficulté existe aussi chez des étudiants qui se présentent au CAPES de SVT comme le signale le rapport du jury de 2008, où il est indiqué que les candidats ne font pas la différence entre chromosome, gène et allèle. Cette notion encore difficile après des années d'étude spécialisée en biologie, montre la persistance des difficultés liées aux différents niveaux impliqués.

III. … et au caractère abstrait du sujet

Knippels, Waarlo et Boersma (2005) reviennent eux aussi sur ces difficultés liées aux différents niveaux dans leur étude. Ils cherchent à déterminer les principaux problèmes des élèves et des enseignants lors de l'apprentissage de la génétique dans le secondaire aux Pays-Bas. Ils retrouvent ainsi les difficultés citées par les auteurs précédents :

> « a) the domain-specific vocabulary and terminology, b) the mathematical content of Mendelian genetics tasks, c) the cytological processes and e) the complex nature of genetics: a macro-micro problem » [a) le vocabulaire et la terminologie spécifiques du domaine, b) le contenu mathématiques des tâches de croisements génétiques de Mendel, c) les processus cytologiques et e) la nature complexe de la génétique : le problème macro-micro] (Knippels, Waarlo et Boersma, 2005).

À ces quatre difficultés, ils en ajoutent une cinquième : celle du caractère abstrait du sujet étudié.

Des interviews, constituées de discussions menées à partir de questions ouvertes, de 22 élèves de 16-17 ans confortent cette idée. Les questions portent sur le passage de l'information génétique d'une génération à l'autre, les effets des mutations sur la descendance et les différentes formes de cellules dans le corps malgré le fait qu'elles contiennent toutes des chromosomes. À partir des réponses de ces élèves, Knippels a pu dégager que, ce qui bloque les élèves lors de l'apprentissage de la génétique, est notamment le fait que l'enseignement de cette matière ne soit pas relié à des problèmes du quotidien, personnels ou sociétaux dans les programmes néerlandais. Cela augmente sa nature abstraite et engendre une démotivation des élèves aux Pays-Bas lors de leur

apprentissage. Leur compréhension de la génétique est alors limitée, confuse et entraîne des difficultés d'apprentissage pour des notions comme la division cellulaire, la structure de l'ADN ou le support de l'information génétique.

IV. D'autres difficultés liées à la spécificité de la structure de l'information génétique sous forme d'ADN

La structure de l'ADN est représentée par plusieurs types de figures, toutes disponibles pour l'enseignement. Pfriedrichsen et Stone (2004) ont mené une étude aux Etats-Unis pour modéliser les conceptions des élèves en génétique moléculaire afin de faire des propositions pour améliorer la compréhension de ces notions lors de leurs enseignements. Pfriedrichsen a demandé à 300 élèves de lycée de dessiner une molécule d'ADN. Elle a ensuite interviewé 14 élèves volontaires pour qu'ils commentent et expliquent 12 dessins sélectionnés représentant l'ensemble des productions et qui correspondent aux quatre catégories qu'elle a prédéfinies :

> « Double helix with bases, Double helix/ladder structure, Chain of chromosomes, Didn't know » [Double hélice avec bases, Double hélice / structure en échelle, Chaîne de chromosomes, Ne sait pas] (Pfriedrichsen et Stone, 2004).

Sur les 12 productions sélectionnées, huit élèves dessinent une simple échelle sans indiquer les éléments qui la constituent, un élève dessine la molécule d'ADN comme une chaîne de chromosomes et les trois autres ne dessinent rien. Aucun élève ne donne la structure de la molécule d'ADN avec bases, phosphates et sucres.

Certains élèves interviewés expliquent leurs difficultés à faire la différence entre chromosomes, ADN et cellules par les illustrations figurant dans les ouvrages scolaires. Lorsqu'ils observent simultanément ces illustrations, ils ne comprennent pas les rapports de taille entre les objets. Bien souvent, les échelles ne sont pas respectées : l'illustration de la structure de l'ADN (représentation issue d'un logiciel de simulation ou photo d'une structure réalisée avec boules et bâtons) est bien plus grosse que l'illustration (photo, dessin ou schéma) de la cellule placée à côté. Or comment une grosse molécule peut-elle être contenue dans le noyau d'une cellule plus petite ? Ces difficultés sont aussi liées au peu de références aux échelles ou à la taille des objets dans les manuels scolaires. Les grossissements effectués sont rarement précisés, ce qui ne facilite pas la compréhension des relations métriques entre objets biologiques. D'ailleurs, nous pouvons remarquer que, pour les illustrations présentes dans ce manuscrit, peu de grossissements ou d'échelles sont précisés car ils ne sont pas indiqués dans les sources. Nous remarquons que l'échelle n'est jamais précisée sur les schémas, elle l'est seulement sur les photos issues de microscopes électroniques (et parfois optiques).

La structure de l'information génétique sous forme d'ADN, en dehors de son positionnement dans l'organisation biologique, pose donc un réel problème en elle-même. Mais l'ADN n'est pas seulement difficile à comprendre par sa structure, il l'est également par sa fonction : l'expression du génotype pour la détermination du phénotype d'un individu.

Khattech, Abbes et Orange (2007), dans leur étude, proposent à des lycéens et à des étudiants tunisiens deux illustrations de la molécule d'ADN écartées à l'époque par Watson. La première illustration est une molécule d'ADN à trois brins avec au centre un squelette sucre - phosphate. Ce modèle a été rejeté par la présence des trois brins (deux seulement ont été observés par radiographie), le manque d'eau dans la molécule et le fait que la réplication et la transcription ne sont pas possibles avec une telle structure. Le deuxième modèle présenté est une hélice à double brins, mais dont les bases identiques sont appariées (A-A, C-C, T-T, G-G). Comme nous l'avons vu dans la partie sur l'étude historique de la découverte de ce concept, cet appariement n'est pas possible car ce sont les bases différentes qui s'attirent préférentiellement, et lorsque deux bases identiques sont couplées la structure de la molécule est très fragile. De plus, ce modèle ne respecte pas la règle établie par Chargaff qui explique que le nombre de guanine est égal au nombre de cytosine et celui de thymine au nombre d'adénine. Ces auteurs demandent aux élèves et étudiants de justifier le rejet de ces représentations. Plusieurs justifications sont possibles et attendues : des justifications d'ordre physique, d'ordre biologique ou d'ordre chimique et qui ont autant rapport à la structure qu'à la fonction. Ils cherchent justement à découvrir si les élèves utilisent ou non, plus une catégorie de réponses qu'une autre. Les justifications données par les élèves sont essentiellement liées à la structure et non à la fonction. Cette étude amène à conclure à « un cloisonnement (…) entre les propriétés physiques et biologiques de l'ADN » (Khattech, Abbes et Orange, 2007) lors de l'enseignement. Ce cloisonnement empêche les élèves de comprendre la molécule d'ADN. La connaissance de la structure (propriété physique de la molécule) et de la fonction (propriété biologique) sont toutes deux importantes et nécessaires pour comprendre cette notion et son articulation avec les autres objets du monde biologique.

V. Difficultés liées à la caractérisation des conceptions en génétique

D'autres études, comme celle de Tsui et Treagust (2007), ont cherché à caractériser et quantifier le changement conceptuel d'élèves australiens lors de l'apprentissage de cette notion. Pour se faire, ils regardent l'évolution des conceptions des élèves avant et après la réalisation d'une situation. Ils cherchent ensuite à déterminer le statut de ces conceptions grâce à l'adaptation de la catégorisation réalisée par Hewson et Lemberger (2000) et Thorley (1990). Ainsi ils déterminent si la conception est intelligible, plausible et utile (« intelligibility, plausibility and fruitfulness », Tsui et Treagust, 2007, p.215). Ces conceptions ont été déterminées avant l'expérimentation et ensuite, elles sont attribuées à chaque élève par interprétation de leur discours. Cette étude est très intéressante mais il reste un problème : comment, les conceptions qu'ils utilisent dans leur étude, ont-elles été formalisées et dégagées des productions des élèves.

Dans l'étude de Khattech et Orange (2005), on retrouve également des conceptions à propos du gène. La catégorisation utilisée dans cette recherche est, cette fois-ci, justifiée par les différentes phases de l'évolution historique du concept. Par contre, de nouveau, il n'y a aucune indication sur l'attribution des conceptions aux élèves, ni sur la méthode de modélisation de ces conceptions.

VI. Constat

Ces différentes recherches ont permis de dégager les difficultés des élèves dans le domaine de la génétique et plus particulièrement celles concernant l'information génétique. L'ensemble de ces études internationales explique que les difficultés des élèves sont liées, en partie, à des confusions entre les différents niveaux biologiques. Les élèves ont des difficultés à raisonner à différents niveaux d'organisation et ils présentent aussi des difficultés à lier ces différents niveaux biologiques entre eux. Ils ont du mal à faire le lien entre les entités symboliques et les entités physiques, et à comprendre leurs rôles dans la synthèse des protéines. Ce problème est dû, selon ces différents auteurs, à l'impossibilité de manipuler directement les objets impliqués dans le raisonnement, c'est à dire au degré d'abstraction à mettre en œuvre pour les visualiser. En effet, les cellules, les chromosomes, l'ADN sont des objets invisibles à l'œil nu, et qui nécessitent l'utilisation d'un outil supplémentaire. Pour les observer, les élèves doivent faire appel à du matériel comme le microscope et la manipulation de ce matériel entraîne de nouvelles difficultés d'ordre pratique. De plus, l'utilisation de formules mathématiques pour dégager certaines informations, comme la distance entre gènes, complexifie la compréhension de la génétique. Ces difficultés correspondent en partie aux obstacles que nous avons mis en évidence lors des analyses présentées dans le chapitre I : la présence d'un même matériel sous différentes formes, les liens entre les objets et niveaux biologiques présents, le degré d'abstraction nécessaire à la compréhension de ces objets biologiques.

Des études, comme celles de Morimoto (2002) au Japon, de Zion et al. (2006) en Israël ou de Duncan et Reiser (2007) aux USA ont proposé des solutions pour aider les élèves lors de l'apprentissage. Les situations proposées font principalement intervenir des situations de travaux pratiques dans lesquelles ils font varier les expériences ou le matériel biologique à expérimenter pour changer les expérimentations proposées habituellement.

Nous avons remarqué qu'il existe un réel manque dans la recherche de ce domaine concernant la formalisation, la modélisation des conceptions le lien entre les réponses des élèves et les conceptions modélisées. De plus, aucune des études que nous avons analysées ne propose de travail sur la modification de l'information génétique. Ils se concentrent presque exclusivement tous sur la transmission de l'information génétique, ce qui, bien sur, permet d'atteindre les conceptions des élèves sur l'articulation des niveaux biologiques. Mais travailler, comme nous le proposons, sur la modification de l'information génétique, permet d'accéder à des informations supplémentaires grâce aux raisonnements que les élèves mettent en place. Nous pouvons ainsi obtenir leurs connaissances et en déduire des conceptions, sur la structure de l'information génétique, grâce à l'action de modification qui est réalisée sur un objet biologique particulier.

Bien sûr, nous ne perdons pas de vue le raisonnement sur plusieurs niveaux biologiques. Un problème sur la modification de l'information génétique permet aux élèves de travailler sur l'ensemble des niveaux biologiques impliqués en génétique et qu'ils ont étudiés au cours de leur scolarité, en même temps que l'information génétique.

Le but de notre étude est alors de proposer un modèle plus formel pour le diagnostic des conceptions des élèves lors de l'élaboration d'une expérience. Nous nous proposons de vérifier, dans les productions des élèves français de seconde générale, si certaines difficultés énoncées ci-dessus persistent. Ce sera la première étape de notre situation. Les difficultés auxquelles nous nous intéressons plus particulièrement et que nous espérons retrouver sont principalement celles liées à l'articulation des différents niveaux biologiques

impliqués dans la compréhension de phénomènes génétiques en biologie. Pour l'ensemble de nos travaux et afin de construire notre situation finale, nous nous sommes appuyés sur un cadre théorique que nous explicitons dans la partie suivante.

Deuxième partie : Références théoriques et questionnement

Chapitre III : Cadre théorique

Dans le but de faire un diagnostic des conceptions d'élèves élaborant une expérience, il est nécessaire qu'ils mobilisent leurs connaissances. Ces connaissances vont ensuite être formalisées à l'aide du modèle cK¢ pour aboutir au diagnostic. Afin de réaliser ce travail, nous avons mis en place une situation faisant intervenir l'élaboration d'une expérience. Cette situation s'appuie sur différentes théories et modèles explicités dans ce chapitre : théorie des situations didactiques, modèle cK¢, modélisation, diagnostic … Nous allons, dans un premier temps, définir la notion de conception.

I. Conceptions et obstacles

1) Conceptions

La notion de conception a été créée pour parler des connaissances des élèves à un moment donné. C'est la définition qu'en donnent Balacheff et Margolinas (2005, p.5) que nous retiendrons dans le cadre de notre étude :

> « Une conception est une instance de la connaissance de l'apprenant, qui se distingue par la représentation et les traitements qu'elle mobilise, mais dont la portée est locale, attestée sur un domaine de validité et d'efficacité particulier (éventuellement scolaire). ».

Une conception d'un apprenant se réfère à une connaissance donnée et est pertinente sur un domaine de validité donné.

Chez un même sujet, différentes conceptions concernant un problème identique peuvent coexister. C'est en partie dû au fait que dans l'enseignement : « Le professeur a le choix entre enseigner un savoir formel et dénué de sens ou enseigner un savoir plus ou moins faux qu'il faudra rectifier » (Brousseau, 1986). Ainsi, l'enseignement d'un premier savoir va permettre à l'élève de mobiliser des connaissances qu'un autre enseignant, dans une situation différente et sur un autre domaine de résolution, cherchera à faire évoluer. À un moment de l'apprentissage, les connaissances seront donc invalides par rapport au savoir enseigné et nouvellement présenté, mais vraies sur un certain domaine de validité, le seul rencontré jusque-là par l'élève lors de son cursus d'apprentissage.

On peut illustrer ces propos par l'exemple de l'étude de la respiration. Comme pour beaucoup de savoirs, les enseignants qui abordent pour la première fois une notion avec leurs élèves font appel à des modèles ou des analogies. Cela aide les élèves, mais lorsqu'un deuxième enseignant cherche à approfondir l'apprentissage de ces notions, il se heurte aux limites de l'analogie mise en place. On constate par exemple, que l'utilisation de l'analogie du ballon de baudruche représentant un poumon aide les élèves dans la compréhension de la mécanique ventilatoire mais qu'ensuite c'est un frein à la compréhension de la structure des poumons, et en particulier pour comprendre les échanges entre les poumons et le système circulatoire (Aster n°13, 1991). Ce frein à la compréhension et à l'évolution de la conception est un obstacle didactique que nous définissons dans la partie suivante.

2) Obstacles

La limite des conceptions est révélée par les obstacles qui s'opposent à leur évolution. Ces obstacles sont sources d'erreurs reproductibles et persistantes (Brousseau, 1983).

Les obstacles peuvent être : ontogénétique, didactique ou épistémologique (Bessot, 2003).

- Un obstacle ontogénétique est lié au développement psychogénétique de l'apprenant.
- Un obstacle didactique est lié à la transposition didactique.
- Un obstacle épistémologique est lié à la construction du concept, il est constitutif de la connaissance.

L'obstacle épistémologique a d'abord été définit comme suit par Bachelard (1938) : « on connaît contre une connaissance antérieure, en détruisant des connaissances mal faites».

De nos jours, un obstacle est, comme le disent Astolfi et Peterfalvi (1993), un raisonnement à l'origine des conceptions, il donne sens aux conceptions.

Le rôle de l'enseignant est de proposer à l'élève un problème qui l'amènera à faire évoluer ses connaissances. Ainsi la résolution par l'ancienne connaissance se heurtera à un obstacle et l'obligera à faire évoluer sa conception vers le domaine de validité inhérent à la situation présentée. L'élève est amené à chercher une nouvelle solution et à dépasser l'obstacle. Ce dépassement passe par une adaptation de la conception qui selon Piaget passe par une assimilation (intégration progressive de la nouvelle connaissance à un schème préexistant) ou une accommodation (modification du schème pour permettre l'incorporation de la nouvelle connaissance). Le dépassement de ces obstacles devient dès lors, l'objectif de l'enseignant lors de la création d'une situation d'apprentissage pour acquérir une nouvelle connaissance. Mais, comme le soulignent Astolfi et Peterfalvi (1993), pour qu'un élève soit capable de changer de conception et de surmonter un obstacle, il faut qu'il soit conscient de son erreur. Il est également nécessaire que la proposition alternative dont il dispose lui paraisse satisfaisante pour répondre au problème. Ils font également remarquer qu'un obstacle est relié à plusieurs conceptions, et que l'on peut retrouver ce couple conception-obstacle dans différentes disciplines : cela constitue un nœud d'obstacles « un même nœud d'obstacles – faisant système entre eux – permet de rendre compte de représentations situées dans des champs notionnels variés, leur donnant ainsi sens et cohérence. » (Astolfi et Peterfalvi, 1993). Cette définition nous permet d'avancer qu'une même conception peut amener l'élève à produire plusieurs représentations, sur différents registres que nous définirons dans la partie V.3 de ce chapitre.

Dans notre étude, l'objectif premier étant la mobilisation des connaissances et le diagnostic de conceptions, nous avons cherché à proposer aux élèves une situation dont le domaine de validité est assez large pour englober, à notre avis, les diverses réponses des élèves. Nous pouvons ainsi diagnostiquer et caractériser les conceptions des élèves.

Nous allons maintenant expliquer comment nous souhaitons procéder pour modéliser les conceptions des élèves à partir de l'analyse de leurs productions.

II. Choix du modèle et modélisation des conceptions

Depuis 50 ans, le terme « modèle » est de plus en plus employé par les scientifiques et les chercheurs, notamment les chercheurs en didactique. Ainsi c'est en 1970 et 1980 que les termes « modéliser » et « modélisation » ont été attestés.

La modélisation peut prendre plusieurs sens : elle représente soit l'action de créer un modèle, soit le fait d'appliquer ce modèle sur une notion en choisissant d'utiliser ou non certaines variables, certaines caractéristiques de ce modèle. Le chercheur, lorsqu'il utilise un modèle « cherche à donner du sens au phénomène, il fait un travail intérieur de modélisation, de formalisation, il transpose son expérience dans un registre formel. » (Ney, 2007). Le modèle crée ainsi un lien entre expérience et mathématiques (Legay, 1997) ou, comme le présente « Orange (1997) (...) [c'est une] « interface » entre le registre empirique » (les phénomènes dont le modèle rend compte) et le « registre explicatif » (les éléments permettant de construire différents modèles, de résoudre une classe de problèmes). Cet auteur distingue les fonctions heuristiques et explicatives du modèle qui seraient plus proches du registre explicatif, des fonctions prédictives liées au registre empirique. » (Ney, 2007, p.64).

Pour une même notion, il existe de nombreux modèles, mais, chacun d'entre eux répond à une question particulière et a des fonctions différentes (Ney, 2007, p.75). Ils ont tous, à un moment donné, leur préférence qu'ils soient ou non les plus complexes. L'avantage d'un modèle par rapport à un autre est dû à la pertinence de sa réponse à la question posée à propos de l'objet modélisé. C'est en étudiant la pertinence de cette réponse que le choix du modèle sera possible.

Dans notre situation, la modélisation correspond à l'utilisation d'un modèle, selon certaines de ses caractéristiques, pour formaliser les conceptions. Un tel modèle est utilisé pour donner un statut aux conceptions, pour leur donner un cadre formel et les standardiser afin de pouvoir les diagnostiquer et les comparer. Le modèle que nous allons choisir pour remplir ce rôle sera présent tout au long de notre situation, il nous sert de cadre. Tout d'abord, il sert à la construction de la situation grâce à la modélisation des concepts biologiques en jeu réalisée auparavant. Ensuite, nous l'utilisons lors de la construction des grilles permettant l'analyse des productions et enfin, c'est un outil qui nous permet de reconstruire les conceptions d'un élève à partir des données issues des productions traitées. Ainsi le modèle qui nous permettra au mieux, dans le cadre de notre situation et avec la variété de productions d'élèves dont nous disposons, de reconstruire les conceptions des élèves, sera choisi. Le modèle choisi pour notre situation doit nous permettre d'identifier les différents indicateurs des conceptions dans les productions des élèves afin de diagnostiquer les conceptions sur la modification de l'information génétique et de les formaliser.

Afin de choisir ce modèle, il est utile de regarder certains de ceux qui ont déjà été utilisés pour étudier les conceptions en biologie et les possibilités qu'ils proposent.

1) Modélisation des conceptions en biologie

Dans plusieurs articles de didactique de la biologie traitant de l'étude des conceptions des élèves, plusieurs formalismes sont utilisés pour modéliser ces conceptions.

Nous pouvons ainsi trouver, par exemple, le modèle allostérique de Giordan (1992), la problématisation proposée par Fabre et Orange (1997) ou le modèle KVP de Clément (2004).

Ces modèles présentent des inconvénients et des limites dans un contexte de diagnostic systématique.

Les deux premiers modèles, le modèle allostérique et la problématisation permettent de créer des situations d'apprentissage favorables à la mobilisation des conceptions et de caractériser les conceptions mobilisées. Dans le cas de problématisation, la mobilisation des connaissances est étudiée dans des situations de débats en classe. Ces deux modèles rendent plus accessibles l'étude des difficultés des élèves et le changement conceptuel. C'est d'ailleurs leur but : étudier, évaluer le passage d'une conception à une autre et leur mobilisation lors d'une situation d'apprentissage. Ce but est un peu différent du nôtre. Dans notre étude, nous cherchons à créer une situation de diagnostic des conceptions afin de les faire émerger et de les modéliser dans le cadre d'une situation de travail individuel en TP. Le modèle d'apprentissage allostérique (Giordan, 1992) et le cadre de la problématisation (Fabre et Orange, 1997) ne correspondent donc pas à nos objectifs et ne seront pas utilisés pour le diagnostic et la modélisation des conceptions dans notre situation.

Le troisième modèle est, lui, utilisé pour formaliser les conceptions comme nous cherchons à le faire. Cette formalisation est associée aux notions de valeurs et de pratiques. Ces notions n'apparaissent pas dans notre étude même si elles pourraient amener des éléments intéressants, notamment vis à vis des pratiques en TP. Elles n'ont pas été retenues dans notre étude et ce modèle n'a donc pas été choisi.

De plus, un des objectifs de la modélisation des conceptions dans notre étude est de créer une situation de diagnostic utilisant un EIAH. Il est donc nécessaire que le cadre de modélisation réponde à un formalisme qui pourrait être implémenté dans un EIAH, ce qui n'est pas le cas des trois modèles présentés. En effet, nous cherchons étudier les conditions de la mise en œuvre d'un diagnostic, en nous basant sur l'analyse des productions des élèves.

Le modèle avec lequel nous avons choisi de travailler doit répondre à l'ensemble de nos exigences :

- Modèle s'appuyant sur notre cadre théorique,
- Modèle proposant un formalisme pour un tuteur (EIAH),
- Modèle avec deux finalités : la caractérisation des conceptions des élèves, et le diagnostic de ces conceptions

Un modèle possible est le modèle cK¢ de Balacheff (1995). Nous utilisons ce modèle pour formaliser, dans le cadre de notre étude, les conceptions dégagées. De plus, ce modèle devrait nous permettre d'obtenir un formalisme compatible avec le développement d'une situation qui utilise un EIAH et a pour objectif le diagnostic systématique par un tuteur (bien que le développement du tuteur ne soit pas l'objet de cette thèse, mais une retombée possible).

2) Le modèle cK¢

Le modèle cK¢ (Balacheff, 1995), développé dans les années 90, est avant tout un modèle élaboré pour modéliser les conceptions en mathématiques. Il se place à la fois dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques de Brousseau, où les interactions entre l'apprenant

(actions) et le milieu (rétroactions) permettent de construire la connaissance, et dans celui de la Théorie de Champs Conceptuels de Vergnaud.

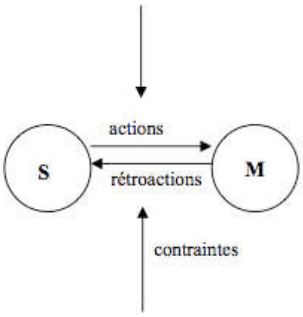


Figure 14 : Schéma des interactions sujet - milieu

Selon Vergnaud, la notion de concept est définie comme :

> « C = (S, I, $\mathcal{S}$)
>
> S : l'ensemble des situations qui donnent du sens au concept (la référence)
>
> I : l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité des schèmes (le signifié)
>
> $\mathcal{S}$: l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant). » (Vergnaud, 1990, p.145)

Balacheff a adapté cette modélisation en ajoutant une structure de contrôle :

> « Nous appelons conception C, un quadruplet (P, R, L, Σ) dans lequel :
>
> - P est un ensemble de problèmes sur lequel C est opératoire ;
>
> - R est un ensemble d'opérateurs ;
>
> - L est un système de représentation, il permet d'exprimer les éléments de P et de R ;
>
> - Σ est une structure de contrôle, elle assure la non-contradiction de C.
>
> En particulier, un problème p de P est résolu s'il existe r de R et s de Σ tel que
>
> s(r(p)) = vrai. » (Balacheff, 1995, p.224)

L'ensemble des problèmes P définit une conception dans laquelle un ensemble d'opérateurs R sont valides. Ces opérateurs, répondant à des règles d'action spécifiques, sont différents en fonction du système de représentation (L) dans lequel ils sont utilisés : textuel, graphique, sensitif, expérimental… La structure de contrôle Σ permet le choix des opérateurs et la validation des résultats par les élèves.

> « Nous appelons *problèmes* les perturbations du système. Le domaine de la validité de la conception, ou sphère de pratique, est constitué de l'ensemble des problèmes que la conception permet de

> résoudre et qui ne conduisent pas à une rupture de l'équilibre du [sujet<>milieu].
>
> Nous appelons opérateur ce qui permet la transformation des problèmes ; ces opérateurs sont attestés par des productions et des comportements.
>
> Un système de représentation (langagier ou non) permet l'expression des problèmes et des opérateurs.
>
> Enfin, une structure de contrôle assure la non contradiction de la conception et contient au moins sous la forme d'oracles les outils de décision sur la légitimité de l'emploi d'un opérateur ou sur l'état (résolu ou non) d'un problème. » (Balacheff et Margolinas, 2005, p.6).

Les opérateurs peuvent être des actions en elles-mêmes. L'exemple ci-dessous illustre ces quatre éléments.

> « **Conception 2** : surcomptage 16 & 4
>
> **P** : Problèmes de type : Combien font 16 et 4 ? (Les nombres sont nommés, les collections sont absentes, un nombre ne doit pas dépasser environ 10).
>
> **R** : prononcer les nombres tout en déployant les doigts successivement.
>
> **L** : geste du déploiement des doigts, comptine orale à partir d'un nombre donné.
>
> **Σ** : contrôle auro-visuel de la correspondance entre le nombre de doigts déployés et les nombres énumérés, le contrôle de l'énoncé de la comptine. » (Ibidem, p.8)

Dans le cas de notre étude, la formalisation sera une aide au diagnostic des conceptions des élèves à propos d'un problème unique. Ces conceptions seront différenciées par les opérateurs et les contrôles mis en œuvre et cités par les élèves. Nous pourrons identifier les conceptions grâce à la présence, dans les productions des élèves, d'opérateurs et/ou de contrôles particuliers (comme nous le montrons dans le Chapitre V.IV. qui présente la modélisation effectuée).

Ce modèle a été construit pour formaliser les conceptions en mathématiques et a été employé par Vadcard (2002) en géométrie par exemple. Il a également déjà été utilisé pour le domaine de la médecine et plus particulièrement de la chirurgie (Vadcard, 2005). Il a aussi été employé pour le domaine des sciences expérimentales et plus particulièrement en sciences physiques par Goury (2008). Nous nous proposons, dans le cadre de notre situation, d'appliquer ce modèle aux sciences du vivant.

Dans notre étude, nous avons réalisé la modélisation de la notion biologique en jeu avec le modèle cK¢ et à partir de l'étude de la littérature. Cette modélisation a ensuite été employée lors de l'élaboration de la situation de diagnostic des conceptions faisant intervenir un EIAH puis lors de la construction des grilles pour l'analyse des productions des élèves obtenues lors de la situation et enfin à l'occasion de l'interprétation des résultats.

La formalisation *a priori* est une piste de départ pour le diagnostic des conceptions des élèves. Pour réaliser ce diagnostic, divers outils sont nécessaires.

III. Diagnostic des conceptions

Pour construire la situation diagnostic la plus adaptée à notre recherche, il nous a paru utile de connaître les différents outils et méthodes employés pour cette tâche.

1) Plusieurs types de diagnostics

Le mot diagnostic vient du grec diagnosi, qui signifie par, à travers et de gnosi, la connaissance, le discernement cela signifie donc « connaître par ». Lorsque l'on parle de diagnostic dans le domaine des EIAH, on peut donner la définition suivante : « processus d'inférence à partir des observables (…) il va de la simple évaluation des réponses jusqu'à la reconstruction des connaissances implicitement mobilisées par l'élève » (Hibou et Py, 2006, p.98). Ce diagnostic sert à établir un modèle de l'élève qui propose plusieurs débouchés possibles, indépendants les uns des autres ou non :

- Faire un état des lieux des connaissances et compétences des élèves,
- Proposer des rétroactions à l'apprenant lors de son action,
- Prévoir le comportement d'un élève face à une situation donnée (Ibidem).

Dans notre étude, nous cherchons à faire un état des lieux des conceptions des élèves de niveau seconde sur la modification de l'information génétique, à partir d'observables qu'ils produisent lors de l'élaboration d'une expérience sur ce sujet biologique.

Il est possible d'établir un modèle de l'élève, qui représente un état de connaissances à un moment donné dans une situation donnée, grâce à plusieurs types d'informations. Ces informations peuvent être de nature cognitive, comportementale ou psychologique (Ibid.).

> Ainsi, « le diagnostic, considéré comme l'ensemble des processus de mise à jour du modèle de l'élève, s'effectue à plusieurs niveaux : au niveau comportemental, il s'agit de traiter le comportement de l'apprenant et ses produits, mais non l'état mental qui l'a généré ; au niveau épistémique, il s'agit de traiter l'état des connaissances de l'apprenant ; au niveau stratégique, on s'intéresse aux buts et aux intentions. (…) le diagnostic cognitif peut être considéré comme un processus visant à inférer les caractéristiques cognitives d'un sujet à partir de son comportement : on fait l'hypothèse que les observables recueillis à l'interface manifestent un certain état de connaissances, et l'on cherche à reconstruire cet état de connaissances sur la base des observations ». (Ibid., p.103).

Nous considérons que pour réaliser un diagnostic, il existe deux types de situations :

- Le diagnostic manuel, qui est réalisé « à la main » par le chercheur
- Le diagnostic automatique, qui est réalisé par un système informatique. Il est totalement ou partiellement automatisé, grâce à un programme qui analyse les données.

Quel que soit le type choisi, le diagnostic peut s'effectuer selon trois modes différents. Il peut être invisible pour l'élève et sans interactions avec lui, il est alors qualifié de passif. S'il est toujours invisible pour l'élève mais que le déroulement de la situation est dépendant de

sa présence, alors on dit qu'il est en mode actif. Et enfin, dernier mode, il devient interactif lorsque l'élève s'en rend compte (Ibid.).

Pour mener à bien ce diagnostic, qu'il soit automatique ou manuel, plusieurs outils sont disponibles pour les chercheurs qui travaillent sur la mobilisation des connaissances en biologie.

2) Différents outils techniques

Le diagnostic fait appel à plusieurs outils pour être réalisé. Tout d'abord, il existe plusieurs techniques de recueil de données et nous allons en citer quelques-unes. Ensuite ces données sont analysées à l'aide de modèles, dont les deux proposés ici.

Les outils de recueil de données peuvent être utilisés quel que soit le type de diagnostic. On retrouve ainsi la possibilité d'employer, en biologie et plus particulièrement en génétique :

- Un questionnaire à choix multiples (Lewis et Wood-Robinson, 2000),
- Un questionnaire avec des questions ouvertes et la possibilité de répondre en quelques lignes (Duncan et Reiser, 2007),
- Un schéma ou graphique à réaliser (Rotbain, Marbach-Ad et Stavy, 2005),
- Un exercice à résoudre (Marbach-Ad et Stavy, 2000),
- Une interview d'élève pour l'amener à expliciter ses réponses soit à partir de questions orales, soit à partir de productions issues des outils cités précédemment (Venville et Donovan, 2007)…

L'ensemble de ces outils permet d'obtenir directement les productions des élèves concernant un problème particulier, ce sont donc des informations explicites sur leurs connaissances.

Il est également possible de se servir d'enregistrements audio et/ou vidéo afin d'étudier le comportement et le vocabulaire des élèves lors de la réalisation d'une situation. Des informations, de nature cette fois-ci implicite, sont alors accessibles aux chercheurs. Ce sont les discours et les gestes des élèves qui seront étudiés et apporteront des informations complémentaires pour le diagnostic.

Nous n'utiliserons pas tels quels les outils présentés ci-dessus car leurs utilisations présentent certaines limites. La première limite est le fait que ces outils sont souvent utilisés seuls. On n'obtient donc qu'une seule représentation de l'élève sur un problème. La deuxième limite importante se retrouve lorsque plusieurs outils sont utilisés (fait plus rare dans les articles que nous avons étudiés), ils portent sur des situations différentes, des problèmes différents. Et si les problèmes proposés aux élèves sont différents, les réponses et les connaissances qui en découlent le sont également. Etant donné qu'il est difficile de faire un parallèle entre les réponses données par les élèves à propos des différentes situations, ce type de diagnostic est rarement effectué.

Nous allons donc vous présenter les méthodes de recueil des connaissances d'élèves que nous avons choisis et l'utilisation que nous allons en faire, afin de dépasser ces limites.

3) Nos modes de recueil de productions d'élèves

Pour pallier ces limites, nous avons décidé d'utiliser plusieurs outils de recueil de productions d'élèves. Notre objectif est d'obtenir différentes expressions ou représentations sémiotiques des élèves, et ce sur une même situation problème, afin de pouvoir les croiser et obtenir une plus grande richesse de données.

Nous avons sélectionné les outils suivants, qui seront développés dans l'environnement informatique LabBook :

- Une question ouverte qui est notre point de départ et permet d'obtenir une réponse sous trois formes différentes :
  - Un texte pour récolter des éléments des connaissances des élèves sur le problème posé par la question et leur laisser la liberté de répondre avec leurs mots et de donner les explications qu'ils souhaitent.
  - Un schéma reprenant et illustrant une des idées que les élèves expriment dans le texte.
  - Un protocole expérimental rédigé, qui apporte une autre forme de réponse et permet d'explorer un ensemble plus important d'éléments de la réponse représentée dans le schéma. Il propose ainsi une activité expérimentale.

Ces outils nous placent dans une situation qui permet l'obtention d'informations de nature explicite. Le déroulement de cette situation est dépendant des actions de l'élève.

Une fois les différents modes de recueil de productions d'élèves choisis pour la construction de notre situation, il est nécessaire de déterminer plus précisément le problème à poser aux élèves ainsi que le domaine de validité de sa réponse. Afin d'établir ces deux paramètres, il est utile de modéliser la notion en jeu et les difficultés dégagées de la littérature et de l'étude du savoir savant. Cependant, pour réaliser cette modélisation des concepts, nous devons en premier lieu choisir le cadre théorique dans lequel nous allons placer notre situation.

IV. Théorie des Situations Didactiques

Lors de notre recherche, la situation a été modélisée dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques (Brousseau, 1982) et nous avons adopté l'organisation suivante :

- Construction et analyse théorique *a priori* d'une situation pour le diagnostic de conceptions après avoir effectuer un état des lieux de la notion et des difficultés dégagées de l'étude de la littérature
- Analyse préalable de la situation pour anticiper les réponses possibles des élèves
- Expérimentation de cette situation en classe
- Analyse *a posteriori* de la situation à l'aide d'une grille d'analyse conçue à partir de la modélisation de la notion et comparaison avec la première analyse.

L'ensemble des concepts définis dans la Théorie des Situations Didactiques a été établi par Guy Brousseau, au début des années 80. Elle a pour origine l'idée qu'il est possible de modéliser une situation d'enseignement : les interactions entre les différents acteurs, la

transmission du savoir, les conditions de cette transmission… Cette théorie regroupe différents paramètres qui, ensemble, permettent de décrire et de modéliser une situation didactique : le milieu, les variables didactiques, le contrat didactique. Ces différents paramètres interviennent dans notre situation et nous allons décrire leur rôle.

Une situation didactique est une situation établie par l'enseignant ou le chercheur, mais dans laquelle il n'intervient pas en tant qu'acteur. L'élève construit son savoir par la mise en œuvre d'une action spécifique répondant au problème (Brousseau, 1998). Ce peut être une situation d'apprentissage ou de changement conceptuel si l'on se réfère aux conceptions. Dans notre cas, il s'agit de diagnostiquer les conceptions des élèves sur l'information génétique et ses modifications, il n'y a pas d'enjeu d'apprentissage direct. Le premier élément de la Théorie des Situations Didactiques que nous utilisons pour créer notre situation est le milieu de la situation.

Le milieu joue un rôle central puisque c'est lui qui constitue la situation et permet de lui donner un cadre, des limites. De plus, par les retours qu'il donne à l'élève en réponse à une action, qui va permettre des adaptations de la part de l'élève.

Le milieu est producteur de contradictions, de difficultés et de déséquilibres pour l'élève. Les rétroactions du milieu sont des informations positives ou négatives renvoyées à l'élève en réponse à son action. Ces rétroactions permettent de faire évoluer l'action de l'élève. Le milieu, en plus d'émettre des rétroactions, permet aux élèves d'obtenir un retour sur leur production et ainsi de valider ou non leur procédure, indépendamment de l'intervention de l'enseignant. Le milieu n'est plus alors seulement générateur d'évolution : de milieu d'évolution, il peut devenir milieu de validation.

Quelle que soit la situation, les exigences du milieu correspondent aux choix de la personne qui la construit et permettent à l'élève de répondre au problème.

La création, la mise en place et l'analyse d'une situation et de son milieu sont toujours influencées par le rapport qui existe entre l'enseignant et l'élève : le contrat didactique.

Le contrat didactique, proposé pour la première fois en 1978 par Guy Brousseau, détermine le partage et les limites des responsabilités de chacune des parties impliquées dans la situation.

> « C'est l'ensemble des obligations réciproques et des « sanctions » que chaque partenaire de la situation didactique
>
> - impose ou croit imposer, explicitement ou implicitement, aux autres
> - et celles qu'on lui impose ou qu'il croit qu'on lui impose,
>
> à propos de la connaissance en cause. Le contrat didactique est le résultat d'une « négociation » souvent implicite des modalités d'établissement des rapports entre un élève ou un groupe d'élèves, un certain milieu et un système éducatif. » (Brousseau, 2002).

Le contrat didactique se construit progressivement en fonction de la répétition pour le même savoir :

- Des questions posées par l'enseignant,
- Des informations qu'il donne,
- Des contraintes qu'il impose et
- De la façon dont l'élève interprète les situations successivement mises en place.

Ce contrat, toujours en évolution, est le résultat de tractations conscientes ou non entre l'enseignant et l'élève, et varie en fonction des situations, des personnes impliquées, du contexte … Malgré cette évolution, le contrat didactique est tout de même régi par deux règles dont l'enseignant et l'élève sont responsables et ont connaissance.

- La première est que l'enseignant doit laisser l'élève produire la réponse attendue, seul, en l'aidant dans cette production.
- La deuxième règle implique que, s'il y a rupture, le contrat apparaît et devient explicite (Brousseau, 1998).

Pour faire fonctionner ces éléments de la Théorie des Situations (le milieu et le contrat didactique) dans notre situation, il est nécessaire de définir plus précisément le problème auquel nous voulons que les élèves répondent. Pour cela, nous devons expliciter et justifier des choix qui sont qualifiés de variables didactiques.

Les variables didactiques sont des choix du chercheur, décidés ou non. Chaque variable peut prendre plusieurs valeurs ce qui permet, pour une même situation, de créer plusieurs problèmes.

La nature de ces variables peut changer. Elles peuvent être associées au savoir, à l'organisation de la situation ou aux connaissances des élèves. Dans tous les cas, « seules les modifications qui affectent la hiérarchie des stratégies sont à considérer (variables pertinentes) et parmi les variables pertinentes, celles que peut manipuler un professeur sont particulièrement intéressantes : ce sont les variables didactiques. » (Brousseau, 1982, cité par Bessot, 2003).

En effet, le choix d'une valeur de variable particulière modifiera le problème et donc provoquera des modifications, des adaptations, des régulations de la stratégie de résolution adoptée par l'élève.

Les différentes valeurs d'une variable donnent à l'enseignant diverses possibilités pour construire son problème. Néanmoins, pour l'ensemble des choix effectués, il est nécessaire de définir les variables, et d'expliciter et justifier la valeur de chaque variable, dans la situation. Il est aussi important de préciser les différentes stratégies occasionnées par les changements de valeur de variables.

Le choix de ces variables est donc très important dans notre situation pour que les élèves puissent produire différentes stratégies, toutes valides par rapport à notre problème et que l'on puisse ainsi recueillir l'ensemble de leurs conceptions.

Pour conclure, le système didactique décrit par Brousseau dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques comprend donc une entité de plus que le triangle didactique (élève – enseignant - savoir) : c'est le milieu (cf. Illustration du schéma sujet-milieu).

C'est par ses interactions avec le milieu, et tout en suivant les règles du contrat didactique, que l'élève va devenir acteur de la situation. Le milieu organisé par l'enseignant est donc une des composantes spécifiques de la situation, comme nous le verrons dans le cadre de notre situation de diagnostic dont l'analyse didactique *a priori* sera présentée dans le chapitre V.III de la Troisième partie de ce manuscrit.

V. L'élaboration d'une expérience pour diagnostiquer les conceptions des élèves

L'objectif de notre expérimentation étant le diagnostic de conceptions dans le cadre d'une situation d'élaboration d'expérience, nous avons utilisé le site web LabBook comprenant l'éditeur de protocole COPEX créé par notre équipe. Le site LabBook est une plateforme web étayant l'élaboration d'expérience et regroupant plusieurs outils de production : éditeur de texte – éditeur de dessin – éditeur de tableau – outils de communication et, principale création de notre équipe, COPEX (COnstruire des Protocoles EXpérimentaux). COPEX est un éditeur de protocoles expérimentaux.

1) Pourquoi élaborer une expérience ?

Dans l'enseignement des sciences expérimentales, en France, les TP ou travaux pratiques sont un des moyens parmi d'autres de faire faire des sciences aux élèves. Ces TP ont pour objectif, comme l'indique Millar (2004), de proposer des activités manipulatoires aux élèves afin d'apprendre une notion.

> « 'Practical work' means any teaching and learning activity which involves at some point the students in observing or manipulating real objects and materials. » [Les travaux pratiques correspondent à toutes les activités d'enseignement et d'apprentissage qui entraînent les élèves à manipuler ou observer des objets et matériels réels.] (Millar, 2004).

Le rôle le plus important des travaux pratiques est de permettre aux élèves de mener des activités pratiques et, nous le souhaitons, de lier l'expérimental et le théorique. Ils peuvent ainsi consolider les connaissances abordées en cours par la pratique en TP.

Comme le démontre White (1996) « laboratories motivate, even excite students and are a major attraction for them to study science. » [Les TP motivent, et même excitent les étudiants et sont une attraction majeure, pour eux, pour étudier les sciences.] (White, 1996). Des travaux ont montré que les élèves avaient des difficultés à faire des liens explicites entre la théorie et le pratique.

En effet, lors d'une séance de travaux pratiques, pour certains élèves « le but prépondérant du sujet est la « réussite » plutôt que la « compréhension » » (Séré et Beney, 1997, p100). Le rôle d'une telle séance n'est alors plus le même. Les élèves deviennent simplement des techniciens suivant une recette de cuisine. Ils se contentent de lire les instructions et de les réaliser sans faire le lien avec les connaissances abordées en cours théorique. Ce genre de travaux pratiques est appelé, dans la littérature anglo-saxonne : « cookbook labwork » (Séré et Beney, 1997).

Tiberghien et al. (2001) font également ce constat :

> « Regular laboratory activities do not help students to construct new relations between concepts, percepts and objects. » [Les activités traditionnelles de TP n'aident pas les élèves à construire de nouvelles relations entre les concepts, les percepts et les objets.] (Tiberghien et al., 2001, p503).

Les nombreuses manipulations demandées aux élèves, sans qu'ils aient à réfléchir sur leur rôle et leur nécessité, font perdre de vue aux élèves les objectifs cognitifs du TP faisant le lien entre expérimental et théorique (Millar, 2004).

L'élaboration d'une expérience et notamment d'un protocole expérimental permet aux élèves de redonner du sens à leurs activités pratiques, dans le but de les aider à faire des liens entre le monde empirique et le monde des modèles.

L'élaboration d'une expérience n'est pas une tâche habituelle pour les élèves. Ils ont plus l'habitude de suivre et de réaliser les instructions indiquées sur un protocole que d'en concevoir un, comme nous allons le voir. C'est justement ce passage à l'élaboration du protocole qui intéresse l'équipe, à savoir, connaître et comprendre les processus de réflexion et d'organisation qu'il est nécessaire de mettre en œuvre afin de mener ce travail à bien.

2) Comment élaborer un protocole expérimental lors de l'élaboration d'une expérience ?

Le terme protocole vient du latin *protocollum* et du grec *kollaô* qui veut dire coller. Ce terme a de nombreuses utilisations dans différents domaines : social (règles régissant l'étiquette), informatique (ensemble de contraintes permettant la communication), droit (acte relatif à un traité international), médecine (organisation des soins) … Le domaine qui nous intéresse est la science et la définition du terme protocole dans ce secteur peut être la suivante :

> « Un protocole expérimental est un objet qui décrit une expérimentation. Il définit, selon une organisation temporelle et/ou logique, la liste des tâches expérimentales à exécuter. Chaque tâche est caractérisée par un objectif, une procédure et un ensemble de paramètres dont les valeurs doivent être fixées. Le niveau de détail de description du protocole est lié au niveau de connaissance de la personne qui l'exécute. » (d'Ham, 2009).

Les travaux de recherche sur l'élaboration de protocoles expérimentaux par les élèves, réalisés par l'équipe MeTAH, ont permis de montrer que c'est une activité qui nécessite « de mettre en relation le monde des théories et modèles avec le monde des objets et des phénomènes » (d'Ham, 2009). L'élaboration d'un protocole permet donc aux élèves de faire le lien entre le théorique et l'expérimental. Nous pouvons alors énoncer l'hypothèse de travail suivante : l'élaboration de protocole aide les élèves à faire le lien entre le registre des modèles et le registre empirique en les aidant à mobiliser leurs connaissances.

L'objectif d'un protocole expérimental est de décrire toutes les actions de l'expérience à réaliser afin de répondre au problème posé. Cette expérience suit un principe général élaboré à partir d'hypothèses de résolution du problème formulées par les élèves. L'expérience produite dépend, notamment, du matériel disponible lors de sa phase de réalisation. La tâche d'élaboration de protocole allie donc réflexion et choix pour fournir un bon protocole en vue de sa réalisation.

En effet, avant de rédiger un protocole expérimental, il est nécessaire d'avoir une idée sur la façon dont on veut répondre au problème. On détermine ainsi les hypothèses. À partir de ces hypothèses, on peut construire le principe général de l'expérience qui sera ensuite décrite dans le protocole. Une fois le principe général établi, il est essentiel de faire des choix : sur la ou les techniques à adopter pendant l'expérience, sur les principes expérimentaux choisis, sur le matériel à utiliser, sur les précautions à prendre en compte,

sur la succession et l'ordre des différentes étapes et actions, sur le temps à consacrer à chacune… L'ensemble de ces choix, bien que ne nécessitant pas tous le même niveau de réflexion, entraine la mobilisation des connaissances des élèves dans le but de pré-structurer le protocole pour ensuite le rédiger.

Grâce à ces études précédentes, nous pouvons ainsi établir que l'élaboration d'un protocole expérimental comprend deux phases :

- une phase de réflexion qui s'appuie sur la mobilisation des connaissances des élèves (trouver le chemin de résolution et le principe de l'expérience), et de choix (matériels, techniques...),
- une phase de représentation qui consiste à représenter l'expérience (sous une forme qui peut varier selon le domaine et l'expérience), à rédiger et organiser le protocole…

Tout cela est nécessaire pour que le protocole final conçu soit le plus complet et le plus clair possible, et puisse être réalisé sans problème par une personne différente de celle qui l'a élaboré. Les élèves seront capables eux-mêmes d'évaluer leurs productions, à condition qu'ils disposent de critères. Les différentes expérimentations menées par notre équipe nous ont permis d'établir ces critères et de les proposer aux élèves (d'Ham, 2009 ; Girault et al, 2010).

> « Évaluation du protocole d'expérimentation en tant qu'objet de représentation :
>
> - Le protocole est exécutable : les paramètres des actions sont définis, le protocole est structuré et il respecte les contraintes matérielles et temporelles du TP.
> - Le protocole est communicable : il est adapté au niveau de l'exécutant, il prend une forme facilement lisible, et il contient les types d'information adaptés.
>
> Évaluation de l'expérimentation décrite par le protocole :
>
> - L'expérimentation est pertinente : elle permet de répondre à la question posée.
> - La réponse à la question est fiable : l'exactitude des résultats obtenus (justesse & reproductibilité) est contrôlée. » (d'Ham, 2009).

Ces quatre critères se placent dans le cadre de la théorie épistémologique proposée par Popper (1959) pour qui une théorie est qualifiée de scientifique, si elle est falsifiable. Dans le cadre d'un protocole expérimental, falsifiable correspond à : pertinent (le protocole permet d'obtenir un résultat répondant au problème posé), reproductible (on obtient des valeurs des mêmes ordres lorsque l'on exécute plusieurs fois ce protocole), communicable (il peut être utilisé par une autre personne).

Dans notre situation, c'est bien l'élaboration d'une expérience qui nous intéresse, puisque les élèves mobilisent leurs connaissances et leurs conceptions lorsqu'ils réalisent cette activité. Il a été en effet montré que l'élaboration d'une expérience est fortement guidée par les conceptions qu'ont les élèves du savoir en jeu dans le TP (Marzin et de Vries, 2008). L'exemple traité dans cet article montre que les conceptions des élèves sur la notion mathématique de l'angle va fortement influencer leur protocole de mesure de l'angle facial et en particulier le choix du nombre de points définissant un angle qui peut les amener à produire un protocole non correct.

L'élaboration d'une expérience est donc un bon outil pour amener les élèves à mobiliser leurs connaissances sur un sujet et pouvoir ensuite réaliser un diagnostic de conceptions,

Par contre, dans notre cas, ils ne réalisent pas la situation par la suite et cela amène une inconnue dans ce travail, vis-à-vis de ceux réalisés auparavant.

3) Différentes phases de production dans l'élaboration d'une expérience en travaux pratiques : texte, graphique, protocole

Dans notre situation, les notions biologiques visées sont mobilisées pour résoudre le problème « comment modifier l'information génétique ? ». La tâche de l'élève sera alors de concevoir l'expérience mais sans la réaliser pratiquement car la réalisation d'expérience sur ce sujet impose de trop grandes contraintes à prendre en compte et à dépasser (disponibilité du matériel vivant, manipulation technique, respect de l'éthique, …). La réalisation pourrait se faire dans un deuxième temps en adaptant la situation pour la mise en pratique.

Nous indiquons aux élèves que les protocoles élaborés pourront être proposés à d'autres élèves de niveau scolaire équivalent pour être évaluer. Cela impose aux élèves de proposer un protocole le plus concret possible et réalisable, avec le plus de détails possibles, notamment techniques.

A. Définition et rôle des différentes productions

Les productions des élèves émanant de notre situation correspondent aux différentes étapes par lesquelles il est nécessaire de passer pour élaborer une expérience, mais pas obligatoirement de manière linéaire et systématique. Ces productions sont de natures différentes et font appel à plusieurs types de représentations, qui, selon Duval (1995), appartiennent à différents registres sémiotiques :

- « Le langage naturel : un texte (écrit ou lu) est principalement basé sur ce registre sémiotique.
- Les représentations symboliques. En mathématiques, mais aussi en chimie, un savoir peut se représenter avec des symboles comme dans le cas des atomes comme H, des molécules comme HCl, des équations chimiques.
- Les représentations iconiques. Elles sont une représentation schématique avec laquelle un savoir de chimie peut être représenté (…)
- Les tableaux. Ils constituent un autre type de représentation du savoir. » (Dahmani, 2009)

Par exemple, « l'image d'un tube à essais n'est pas une représentation mais une image de l'objet réel comme une personne peut le voir. En revanche, cette image peut être modifiée par exemple par une annotation précisant la nature chimique du contenu. Cette modification peut se faire avec le registre du langage naturel (acide chlorhydrique) ou symbolique (H^+ + Cl^-) par exemple. » (Pekdag et Le Maréchal, 2003.).

Quel que soit le registre sémiotique utilisé, les différentes représentations permettent de rendre possible et accessibles l'expression des idées des élèves. En effet, comme le

mentionne de Vries (2006) « Une représentation réfère au fait de rendre sensible un objet ou un phénomène absent au moyen d'une image, d'une figure, ou d'un signe. » (p.10).

En s'appuyant sur les connaissances des élèves, « ce sont elles [les représentations] qui permettent l'association entre signifiants et signifiés au détriment d'autres associations possibles. » (de Vries, 2006, p.65). Cette association est particulière, presque unique, car chaque représentation est caractéristique d'un domaine disciplinaire.

Effectivement, une représentation répond à certaines règles, certaines conventions générales et spécifiques. Ces règles sont déterminées comme spécifiques d'un domaine à force d'utilisation par les chercheurs de ce domaine. Elles permettent alors de caractériser une représentation comme représentation disciplinaire (de Vries, 2006).

Les représentations produites ici par les élèves, ont toutes un rôle de formalisation des idées, dans le domaine disciplinaire de la biologie, sous des formes différentes : la rédaction d'idées sur les chemins de résolutions possibles du problème, la représentation graphique d'un schéma d'expérience et sa légende et la rédaction d'un protocole expérimental. Elles appartiennent donc à des registres sémiotiques différents. Nous pensons que proposer à l'élève ces différents modes de représentation successifs (correspondant à plusieurs registres sémiotiques) pour répondre à un même problème leur permet d'aborder différents aspects de leur réponse. La multiplication des modes de représentation, qu'elles soient données ou à produire, permet d'aborder un même problème sous des angles différents. C'est ce que Tsui et Treagust (2007) ont souligné dans leur étude sur l'utilisation du logiciel BioLogica : « de Jong et al. (1998) proposed three reasons for using more than one representation in computer-base Learning environments. First, specific information can best be conveyed in a specific representation. A combination of several representations is therefore necessary to display learning material that contains a variety of information. » [de Jong et al. (1998) ont proposé trois raisons d'utiliser plus d'une représentation dans les environnements informatique pour l'apprentissage. La première est qu'une information spécifique peut être mieux transmise dans une représentation spécifique. Une combinaison de plusieurs représentations est, par conséquent, nécessaire pour exposer le matériel à apprendre qui contient une variété d'informations.] Ainsi, pour nous chercheurs, cela permet d'accéder à plus d'informations dans la réponse des élèves car certains sont plus à l'aise pour s'exprimer avec du texte, d'autres avec des dessins… De plus, en proposant plusieurs systèmes de représentation, nous incitons les élèves à se poser plus de questions quant à la pertinence de leur réponse par l'intermédiaire de différents modes de représentation. Cela permet aussi au chercheur d'obtenir plus d'informations sur les connaissances de l'élève. En effet, certaines connaissances sont plus faciles à représenter graphiquement que textuellement et inversement et les élèves n'ont pas la même habileté avec l'un ou l'autre. Nous pouvons donc obtenir leurs conceptions par rapport au problème posé en étudiant l'ensemble des productions, qui sont complémentaires dans l'expression de leur réponse.

B. Hypothèses de résolution de l'expérience sous forme de texte

Dans la situation proposée aux élèves, les hypothèses se nomment idées mais correspondent bien à différentes hypothèses que les élèves peuvent avancer pour résoudre le problème qui leur est proposé. L'énoncé de ces hypothèses se fait par écrit dans une zone de texte réservée à cette production (outil éditeur de texte du LabBook).

L'importance de l'écriture dans l'expression des idées a déjà été soulevée par de nombreux chercheurs en didactique. Triquet (2001) indique que l'écriture est un outil d'organisation,

d'expression et de communication de ses idées : « écrire pour penser, réfléchir, classifier sa pensée, écrire pour communiquer. » (p.227)

Dans notre situation, la phase d'écriture étant la première phase de production, elle permet aux élèves de mobiliser leurs connaissances et de les adapter à l'exercice afin de répondre au problème. L'écriture est une activité langagière qui, comme le disent Prain, Hand et Hohenshell (2001) joue un « rôle clef (…) dans la construction du savoir et la mise en forme de la pensée » (p.49). En tant que première étape de notre situation, c'est donc une activité capitale pour la suite des productions.

Il est essentiel que lors de cette activité, les élèves expriment leurs principales idées par un texte. Certains pourront même les organiser après écriture en les numérotant par exemple. Pour les aider dans cette phase d'écriture, nous leur avons indiqué oralement que leurs productions sont à destination d'autres élèves de niveau scolaire identique. Cette précision est importante dans une tâche de production car les élèves prennent en compte le destinataire, « les besoins et attentes du lecteur » (Prain, Hand et Hohenshell, 2001, p.49).

Cette phase d'écriture est un outil propice à la formulation et à l'organisation de la pensée. Elle permet aux élèves de structurer leurs idées de résolution du problème. De plus, elle permet à l'élève de s'approprier le problème en choisissant l'une de ses idées pour la développer par la suite et la représenter graphiquement dans la deuxième production demandée dans la situation.

C. Les représentations graphiques

Dans notre situation, la deuxième production demandée aux élèves est un schéma légendé de l'idée qui leur semble la plus adéquate pour répondre au problème. Cette idée est choisie parmi celles décrites dans le texte précédent. L'image ou la représentation graphique pouvant être à la fois utilisée comme outil de communication ou de vulgarisation d'un concept (Dahmani, 2009, p.22), nous choisissons ici de l'utiliser selon une troisième fonction : outil de clarification, d'illustration d'un concept, de représentation.

La représentation graphique permet une approche différente de la connaissance mais nécessaire pour en aborder tous les aspects. Afin de comprendre l'intérêt de cette expression graphique, il est nécessaire d'en donner une définition. Une représentation graphique « est composée de signes iconiques (analogies de la réalité), de signes plastiques (couleur, forme, composition…) et la plupart du temps, de signes linguistiques (légendes, titres...). Dans ce cas l'image peut simplement servir à répéter le texte (c'est sa fonction d'illustration), ou le compléter (complémentarité), ou développer également des significations différentes (relation de distanciation)» (Dahmani, 2009, p.25).

Les représentations graphiques ont un rôle complémentaire au texte, et appartiennent, comme le texte, à un champ disciplinaire particulier.

C'est ainsi que dans leurs représentations graphiques, les élèves utilisent les conventions de la biologie (un cercle = une cellule, une hélice = l'ADN par exemple). Ils utilisent « les propriétés de l'image visuelle pour faire apparaître les relations de ressemblance et d'ordre entre les données » de leurs productions (de Vries, 2006, p.71).

Une fois cette deuxième production réalisée, l'idée développée graphiquement est reprise pour être détaillée dans le protocole expérimental.

D. Le protocole expérimental

La troisième production demandée aux élèves dans notre situation est la rédaction d'un protocole expérimental. C'est encore une production qui appartient à un système de représentation différent : c'est un texte, mais rédigé suivant certaines conventions particulières d'ordre, de mise en page…

La rédaction d'un protocole permet ainsi aux élèves d'exprimer leurs idées sous une forme différente, qui pourra être transmise et utilisée par un autre élève. Cela les oblige alors à organiser leurs idées, à les structurer en une suite logique d'actions pour expliciter, et décrire le principe de l'expérience qu'ils souhaitent réaliser. C'est un travail particulier, puisqu'ils n'ont pas l'habitude d'écrire des protocoles mais seulement de les lire et de les mettre en application.

L'activité d'élaboration d'un protocole permet aux élèves de mettre en forme leur pensée, leurs idées qu'ils ont jetées pêle-mêle sur le « papier » lors de la première phase d'écriture. Ils doivent penser, lors de ce travail d'élaboration et de rédaction à tout ce qui est nécessaire lors de la réalisation de l'expérience représentée graphiquement dans la deuxième production : le matériel biologique, les techniques, les exigences de la réalisation, les mesures de sécurité, la succession d'actions… Ainsi ils traduisent une hypothèse par un texte de protocole et la valide ou la réfute par la réalisation d'une expérience.

Cette troisième production permet une approche différente de la conception, qui en complète l'explicitation et en permet une caractérisation plus fine par la présence d'une succession d'actions qui seront analysés comme autant d'opérateurs (R) de la conception selon le modèle cK¢ (Balacheff, 1995)

Une analyse didactique de la tâche et de la situation s'impose pour évaluer les interactions entre les conceptions des élèves et le problème de la situation à résoudre. Cela nous permettra d'obtenir des informations sur les types de représentations symboliques que les élèves vont produire (texte et graphique) et sur leurs propositions de protocole expérimental. Cette analyse sera présentée dans le chapitre V.III de la Troisième partie.

VI. Un outil au service de notre étude : LabBook

1) Généralités sur les EIAH

Le milieu constituant notre situation comprend un EIAH en construction, ou Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain. Un EIAH est un environnement informatique qui a pour « finalité explicite de susciter et d'accompagner l'apprentissage humain, c'est-à-dire la construction de connaissances chez un apprenant ». (Grandbastien, 2006)

L'émergence de ces logiciels a pour origine les travaux sur l'intelligence artificielle effectués dans les années 70. Le terme EIAH est né, à proprement parler, dans les années 90 et exprime l'importance de lier l'informatique et les différentes disciplines impliquées dans les étapes de construction du savoir (Grandbastien, 2006). La coexistence de plusieurs domaines, explicitement décrite dans le nom, EIAH, fait que la recherche sur les EIAH est toujours pluridisciplinaire : informatique, disciplines liées à l'apprentissage (notamment la didactique) et domaine du savoir de référence implémenté et étudié. En effet, la construction d'un EIAH nécessite la collaboration de chercheurs venant de ces différents domaines, et l'apport de chaque discipline est important lors de la conception comme l'explique Luengo, Vadcard et Balacheff (2006) :

> « L'analyse didactique peut jouer un rôle fondamental dans la conception des différents supports informatiques. Une méthode est d'envisager la conception de l'environnement à partir de l'analyse didactique, en classe, du domaine. » (p53).

Ainsi, pour que la cohérence et la compréhension entre les agents des différents domaines soit la plus complète possible, ce travail collaboratif nécessite que chacun ait connaissance des « concepts, méthodes et outils manipulés par les autres » (Grandbastien, 2006).

Un EIAH permet donc la mise en relation d'acteurs humains (élèves, enseignants) avec une plateforme informatique axée sur l'apprentissage par l'intermédiaire de différents outils : ressources, réseaux, communication, exercices…

Dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser un EIAH afin d'obtenir les productions des élèves dans le but, ensuite, de diagnostiquer leurs conceptions. L'EIAH de notre situation est en cours de développement par notre équipe. Il commence à être utilisé dans diverses situations.

2) LabBook : création et présentation

La création de cet EIAH s'appuie sur plusieurs théories. Tout d'abord, il fait appel à la démarche expérimentale car l'expérience et le protocole expérimental en font partie tant par leur élaboration que par leur exécution et l'obtention des résultats. De plus, le protocole expérimental aide à faire le lien entre la théorie et la pratique comme nous l'avons vu. L'éditeur de protocole étant conçu afin d'aider les élèves à élaborer et structurer un protocole expérimental, son développement est basé sur l'analyse de la tâche (Clark et al., 2006) qui permet d'organiser un protocole selon un arbre des tâches. Le sommet de l'arbre correspond au problème qui peut être résolu par un ensemble de tâches, chacune pouvant se décliner en sous-tâches. Le plus bas niveau correspond aux actions du protocole à réaliser lors de l'exécution (Wajeman, 2009, Girault et al, 2010).

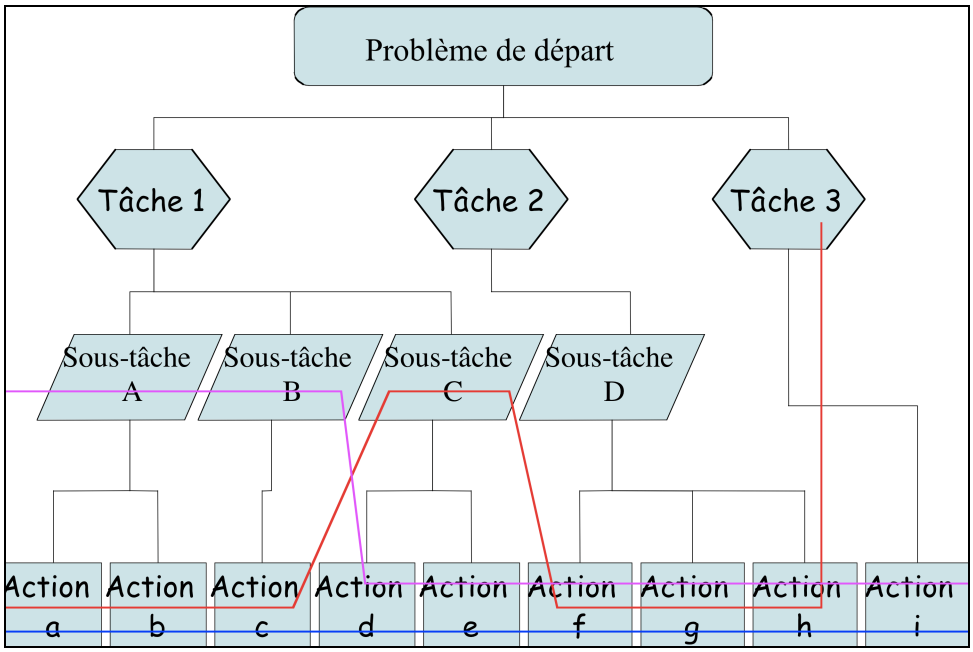


Figure 15 : Schéma général d'un protocole sous forme d'arbre des tâches

L'utilisation de cette structuration en arbre des tâches permet de concevoir la situation expérimentale. Cet arbre est également très utilisé dans l'analyse des productions (protocole expérimental) des élèves et ce, principalement par rapport aux chemins possibles (traits de couleur sur la figure 15) indiqués lors de la succession des actions dans le protocole. En effet, la réalisation d'une expérience passe par l'ensemble des actions pour répondre au problème mais l'explicitation de la totalité de ces actions n'est pas tout le temps obligatoire. C'est du à l'existence de connaissances communes entre la personne qui rédige le protocole et celle qui l'exécute. Ainsi, indiquer une sous-tâche suffira parfois à « l'exécutant » pour comprendre qu'il doit réaliser les actions qui en découlent. C'est là que prend toute son importance le fait d'indiquer aux élèves le destinataire du protocole : un élève de même niveau scolaire.

L'ensemble des recherches de l'équipe MeTAH a mené à la création de LabBook. LabBook a été créé à partir des résultats obtenus lors d'expérimentations papier - crayon menées préalablement en physique, biologie et géologie au lycée. Il a déjà été testé lors de plusieurs séances de travaux pratiques en chimie (d'Ham, 2009) et en physique (Maisch, Ney et Balacheff, 2009) à l'université pour étudier l'aide qu'il peut apporter aux élèves et comment ceux-ci l'utilisent. Dans l'étude de Maisch, LabBook était déjà utilisé pour diagnostiquer le raisonnement des élèves lors d'une séance de travaux pratiques sur la détermination d'un liquide en sciences physique mais sans s'attacher à la modélisation des conceptions puisqu'elles existaient déjà au préalable. Il a pu, à partir d'un modèle de raisonnement donné par la littérature, diagnostiquer les raisonnements des étudiants grâce à l'analyse de leur protocole.

LabBook est une plateforme informatique en ligne sur le web. C'est un logiciel libre que l'on peut utiliser en séance de travaux pratiques et que l'on retrouve à l'adresse suivante : http://copex.imag.fr

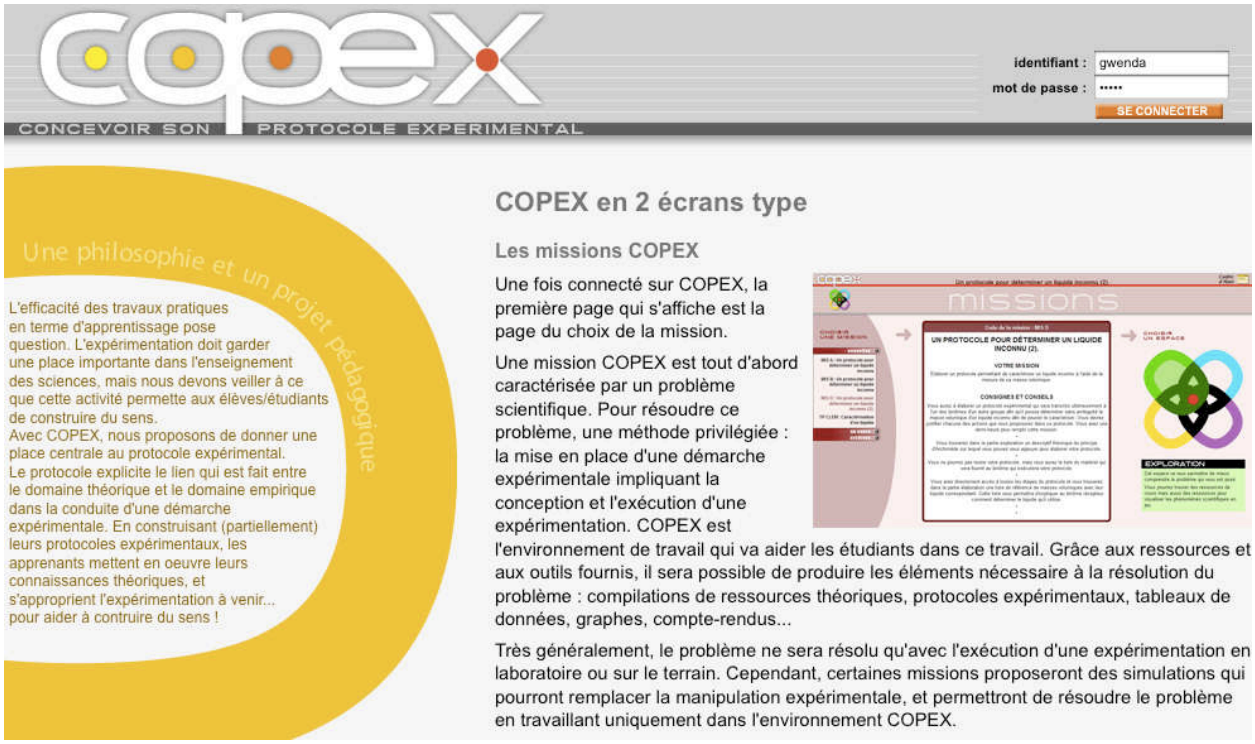


Figure 16 : Plateforme LabBook avant connexion

Son accès est limité par un nom d'utilisateur et un mot de passe permettant à l'enseignant utilisant cet outil avec ses élèves, de sélectionner la ou les situation(s) auxquelles les élèves peuvent avoir accès et d'effectuer, avant que l'élève y accède, un certain nombre de réglages sur les outils à disposition de chaque élève, ainsi que sur les paramètres de chacun de ces outils :

- Préréglages possibles (structuration générale du protocole en étapes, actions prédéfinies, liste de matériel…),
- Outils (Mise à disposition ou non d'un outil),
- Aides (fonctionnement de la plateforme et de chaque éditeur, consignes),
- Ressources (cours et leçons en rapport avec le problème) que les élèves peuvent ou non utiliser.

Après s'être connecté, l'élève a accès à l'ensemble de la plateforme. Elle comprend cinq espaces différenciés qui permettent la réalisation de productions différentes et/ou l'apport d'informations supplémentaires.

- Le premier espace est celui de la mission. Il regroupe un descriptif détaillé du problème à résoudre ainsi que les consignes concernant les productions à réaliser. Cet espace donne également accès aux quatre autres.
    - L'espace vert : exploration, met des ressources à disposition de l'élève, en rapport avec le problème posé.
    - L'espace bleu : protocole, propose un éditeur de protocole : COPEX.
    - L'espace violet : résultats, est un espace dans lequel il est possible de rentrer ces résultats, notamment sous la forme de tableaux.
    - L'espace jaune : publication, est utilisé lors de la rédaction car il contient un éditeur de texte ainsi qu'un outil graphique.

Nous retrouvons donc trois éditeurs qui sont à la disposition des élèves pour résoudre leur problème : l'éditeur de texte, l'éditeur de dessin, l'éditeur de protocole.

Grâce à l'éditeur de texte, ils peuvent formuler à l'écrit leurs hypothèses quant à la résolution du problème. Cet éditeur de texte possède toutes les fonctionnalité que l'on peut attendre : des polices différentes, des tailles de texte, la mise en gras, en italique… Ensuite, l'éditeur de dessin permet de représenter graphiquement ces mêmes hypothèses grâce à des formes prédéfinies (cercle, carré, trait plein, trait pointillé, …) mais aussi grâce à la possibilité de travailler à main levée. Les élèves ont également la possibilité de mettre en couleur une forme ou son contour.

Les élèves vont ensuite utiliser l'éditeur de protocole pour rédiger le protocole expérimental, de l'expérience qu'ils ont choisi parmi leurs hypothèses et qui leur semble la meilleure pour répondre au problème. L'éditeur propose une structuration en étapes et en actions du protocole. Une étape peut comprendre plusieurs actions. En fonction de ce que souhaite l'enseignant, le protocole peut être pré-structuré ou pas. C'est à dire que le nom des étapes peut être indiqué ainsi que le matériel disponible. Il est également possible de proposer des actions aux élèves, pour qu'ils aient déjà du vocabulaire spécifique à employer. L'ensemble de ces réglages est décidé par la personne qui fera réaliser la situation aux élèves et exploitera leurs productions.

L'utilisation de LabBook permet aux élèves de résoudre leur problème avec un maximum d'outils différents. Un autre avantage est le fait que l'ensemble des productions est automatiquement enregistré, ce qui les rend facilement accessibles.

Dans le cadre de ma thèse, j'utilise le site web LabBook bien que n'étant pas spécifique de la génétique. Le fait qu'il serve de support à la réalisation des différentes productions des élèves, lors de l'élaboration d'une expérience a été de facteur de choix déterminant. Notre objectif est de diagnostiquer les conceptions des élèves lors de l'élaboration d'une expérience, c'est pourquoi, au cours de la situation qu'ils ont à réaliser, les élèves ne disposent d'aucune ressource pour ne pas indiquer de connaissances de cours plutôt que leurs connaissances ; l'espace vert n'est donc pas utilisé. Ils ne vont pas non plus réaliser l'expérience dont ils vont écrire le protocole ; l'espace violet n'est donc pas renseigné pour ce problème. En fait, les élèves ne vont utilisés que les partie jaune, publication, et bleue, protocole, pour une production dans chacun des outils disponibles. Ils seront guidés, dans leur utilisation, par les préréglages, les outils et aides présents comme nous le verrons dans l'analyse *a priori* (Troisième Partie, Chapitre V.III).

L'étude de ces références théoriques et l'élaboration de notre cadre théorique nous permettent de dégager notre problématique ainsi que plusieurs hypothèses de recherche que nous tenterons de valider grâce à la situation que nous allons construire.

Chapitre IV : Problématique et hypothèses

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons cherché à résoudre une problématique générale sur les conceptions des élèves en génétique. Afin d'énoncer cette problématique et d'y répondre, nous avons formulé plusieurs hypothèses de travail.

I. Hypothèses de travail

Les hypothèses de travail suivantes sont nécessaires à la résolution du problème et sont considérées comme vraies pour la suite de notre recherche.

HT 1 : Les conceptions des élèves en biologie sont modélisables à l'aide du modèle cK¢.

HT 2 : Les conceptions des élèves peuvent être dégagées à partir de l'analyse de leurs productions écrites.

HT 3 : Les élèves ont des difficultés à conceptualiser la modification de l'information génétique. Leurs difficultés portent sur la localisation de l'information génétique, la structure et la fonction de cette information et les modes de modifications possibles.

HT4 : Une expérience en biologie peut être représentée sous différentes formes dont le protocole, le schéma, le texte…

HT 5 : Une situation demandant aux élèves d'élaborer une expérience sur la modification de l'information génétique va induire la mobilisation de leurs connaissances sur cette notion biologique.

À partir de ces hypothèses de travail, nous avons pu formuler la problématique générale de notre recherche.

II. Problématique et questions de recherche

La problématique générale dégagée de l'étude de la bibliographie, de l'analyse du savoir savant et de notre étude préliminaire est la suivante :

> **Comment modéliser et diagnostiquer les conceptions des élèves sur l'information génétique, lors d'une situation d'élaboration d'expérience, à l'aide de LabBook ?**

De cette problématique générale découlent plusieurs questions de recherche auxquelles nous allons tenter de répondre lors de cette étude.

Questions de recherche :

Q 1 : Quelles sont les conceptions des élèves sur la modification de l'information génétique dans une situation d'élaboration d'expérience ? Quels sont les éléments du quadruplet du modèle cK¢ présents dans les productions des élèves et indicateurs de leurs conceptions ?

Q 2 : Quelles sont les caractéristiques de la situation de diagnostic mise en place ? L'utilisation du modèle cK¢ est-elle pertinente dans notre situation ?

Afin de répondre successivement à ces questions de recherche, des hypothèses de recherche sont énoncées.

III. Hypothèses de recherche

Plusieurs hypothèses découlent de ces questions :

HR 1 : Les conceptions des élèves concernent principalement sur les derniers niveaux étudiés : Chromosome, Gène et ADN.

HR 2 : Les actions de l'expérience élaborée, la justification des choix réalisés et les éléments de connaissances mobilisés sont autant d'éléments qui peuvent être analysés avec le modèle cK¢ pour mener à la conception de l'élève.

HR 3 : Les trois formes de productions différentes (texte, schéma et protocole), permettent de répondre à un même problème posé selon des approches différentes, dans le contexte de l'élaboration d'expérience.

HR4 : L'ensemble des productions développe la même idée principale et sont cohérentes entre elles.

HR 5 : La réalisation de ces trois productions différentes apporte des informations complémentaires qui sont utiles pour la modélisation des conceptions.

HR 6 : L'analyse du savoir centrée sur la localisation de l'information génétique, sa structure et ses modes de modifications, réalisée sous forme de cartes conceptuelles, permet de retrouver *a priori* les éléments du quadruplet du modèle cK¢.

Lors de notre étude, par la mise en place de l'expérimentation et l'analyse de la situation et des productions des élèves nous allons tenter d'apporter une validation de ces hypothèses et de répondre aux questions de recherche ainsi qu'à notre problématique générale.

Troisième partie : Expérimentation

Chapitre V : Méthodologie générale

I. Méthodologie de la création et de la mise en place de la situation

Notre situation fait appel à l'élaboration d'une expérience et à la réalisation de plusieurs productions dont un protocole expérimental. Notre objectif est de diagnostiquer et de formaliser les conceptions mobilisées par les élèves dans ce contexte particulier à l'aide du modèle cK¢. L'expérimentation a fait l'objet de deux étapes préliminaires avant d'obtenir notre situation finale : la validation des niveaux biologiques et la validation de la situation.

La première étape est la vérification et la validation des différents niveaux biologiques présents en génétique, et étant une source de difficultés pour les élèves lors de leur apprentissage (pages 96 à 99). Elle est indispensable, car nous n'avons pas trouvé de données sur les élèves français parmi l'ensemble des études que nous avons lues. Nous voulons donc vérifier si les élèves français de niveau scolaire seconde générale et ayant suivis un cursus de scolarisation général, possèdent ces mêmes difficultés ou en possèdent d'autres. Nous souhaitons également affiner les niveaux biologiques mis en évidence dans la bibliographie pour qu'ils soient plus précis et spécifiques de notre problème biologique.

La deuxième étape de notre expérimentation a pour objectif la validation de la situation (pages 112 à 122). Une fois la situation de diagnostic créée à partir de la modélisation et de l'analyse du problème biologique, il est important de vérifier si elle est adaptée aux élèves, au temps imparti, aux objectifs que l'on a. Cette étape est donc essentielle pour l'expérimentation et elle doit permettre d'adapter et d'améliorer la situation finale expérimentée ainsi que son analyse par le test des grilles d'analyse et ce que l'on peut en tirer.

La troisième étape est l'expérimentation finale de la situation construite à partir des étapes précédentes.

Les résultats de l'analyse de chacune de ces étapes sert donc à la construction de la suivante. Cette méthodologie peut s'apparenté à celle théorisée par Brown (1992) sous le terme de « design experiments » où la méthodologie se construit par ajustements successifs. Chaque étape est testée avec une ou plusieurs classes entières en situation expérimentale.

L'ensemble de cette expérimentation (étapes préliminaires et expérimentation finale) s'est déroulée sur un an (de l'automne 2008 à l'automne 2009). Les trois étapes ont été séparées de six mois et ont été menées avec environ 250 élèves.

Nous allons présenter cette expérimentation en indiquant les conclusions tirées de chacune des étapes qui sont réutilisées pour l'élaboration de la situation finale.

II. Présentation de la situation

La situation que nous avons mise en place et expérimentée dans les classes doit nous permettre d'obtenir des productions d'élèves sur la modification de l'information génétique grâce l'élaboration d'une expérience.

Pour cela, nous avons proposé aux élèves un travail individuel sur ordinateur, d'une durée approximative d'une heure. Au cours de cette situation, les élèves doivent suivre la consigne suivante: « Comment modifier l'information génétique ? ». Pour répondre à cette question, ils ont à réaliser trois productions différentes : un texte rassemblant leurs idées, un graphique représentant l'expérience qui permettrait le mieux de répondre à cette question et issu de leurs premières idées et un protocole expérimental décrivant les actions de cette expérience. Le graphique et le protocole sont tous les deux le développement de la même idée choisie parmi celles du premier texte.

La situation à réaliser comprend trois phases correspondant aux trois productions demandées et à réaliser sur le site web LabBook. En effet, le premier texte où ils rédigent toutes leurs idées pour résoudre le problème leur permet de découvrir et de s'approprier le problème, de commencer à réfléchir à sa résolution. Le schéma légendé amène une dimension graphique qui leur procure un nouveau moyen d'expression et le fait de choisir parmi une des idées énoncées dans la première production les conduit vers des choix pour proposer, selon eux, la meilleure solution au problème. La rédaction du protocole leur apporte une structuration de leur réponse et les oblige à confirmer leurs choix par écrit et à détailler l'expérience qu'ils ont choisi par la suite d'actions à réaliser.

Les deux premières productions sont à faire dans l'espace jaune de publication et donnent ensuite accès à l'espace bleu (protocole) pour la réalisation de la troisième production, le protocole.

À chaque fois qu'ils ont terminé une production, les élèves l'enregistrent afin de la sauvegarder. Ils ne peuvent plus revenir dessus par la suite car la découverte des étayages proposés pour les productions, essentiellement pour le protocole (comme le matériel disponible ou les actions possibles) sont autant d'aides qui peuvent modifier leurs premières idées ou leur en donner d'autres.

De plus, lorsqu'ils ont terminé les deux premières productions, ils appellent le chercheur présent dans la classe pour qu'il leur indique la lettre (lettre entre A et H) du protocole à choisir et à ouvrir. Ce numéro correspond au niveau biologique dans lequel l'élève place ses deux premières productions et qui correspond donc au niveau de modification de l'information génétique qu'il choisit. Neuf niveaux peuvent être proposés aux élèves, dont deux sont présents dans le même protocole (Milieu et Organisme).

Lettre	Niveau
A	Milieu – Organisme
B	Organe
C	Cellule
D	Noyau
E	Caryotype
F	Chromosome

G	Gène
H	ADN

Tableau 3 : Correspondance entre les lettres et le niveau biologique des protocoles

Pour aider le chercheur à orienter l'élève vers le niveau biologique qui lui correspond, une fiche pratique a été distribuée à tous les intervenants (cf. Annexe I). Le texte des idées permet une première vision des idées des élèves et donc des niveaux biologiques auxquels ils pensent travailler. Puis le graphique ne fait appel qu'à un seul niveau. C'est ce niveau biologique qui est proposé aux élèves pour le protocole. C'est donc surtout le graphique qui aide le chercheur dans son choix car le graphique et le protocole sont, théoriquement, deux représentations différentes décrivant la même expérience. Le texte est une première indication, une première orientation où plusieurs niveaux biologiques peuvent ressortir. Le graphique restreint le choix à un niveau biologique.

Une fois les trois productions terminées, ils se déconnectent du site pour clore leur session.

L'ensemble des consignes de cette situation est donné oralement en début de T.P. et les élèves ont également à leur disposition, sur chaque poste de travail, deux fiches papier. Sur la première, on retrouve l'ensemble des consignes de la situation et sur la deuxième, des consignes et des aides pour la navigation dans COPEX.

Modification de l'information génétique

Au cours de cette séance, vous allez concevoir un protocole expérimental permettant de modifier l'information génétique d'un être vivant.

Organisation du travail

Vous travaillerez individuellement sur les ordinateurs en vous rendant sur le site : http://copex.imag.fr

L'ensemble de votre travail fera l'objet de trois productions qui vous enregistrerez au fur et à mesure de votre travail

- Un texte présentant toutes vos idées pour résoudre le problème.
- Un schéma ou dessin représentant l'expérience que vous voudriez réaliser pour résoudre le problème.
- Un protocole expérimental détaillant l'ensemble des actions de cette expérience.

Première partie : prise en main du site et du problème

1. Entrez votre identifiant et votre mot de passe.
2. Lisez le problème et les consignes.

Deuxième partie : Idées et schéma de l'expérience (espace publication – pétale jaune)

Vous avez **1/2h** pour réaliser ces deux productions, passé ce délai, l'enseignant viendra vous voir de toute façon.

3. Donnez vos idées pour la résolution du problème et écrivez-les dans la zone de texte.

4. Enregistrer votre production en cliquant sur l'icône de la disquette.

5. Réalisez un dessin ou un schéma pour illustrer vos idées à l'aide de l'outil dessin.

6. Enregistrer votre dessin en cliquant sur sauvegarder dans le menu déroulant de gauche.

7. **Appelez l'enseignant avant de fermer la fenêtre dessin.**

Troisième partie : rédaction du protocole (espace protocole – pétale bleu)

8. Ouvrez l'éditeur de protocole et choisissez la situation indiquée par l'enseignant.

9. Écrivez le protocole correspondant à vos idées.

a - Indiquez au moins une action (violet) par étape (bleu).

b - Aidez-vous de la liste de matériel et des actions prédéfinies.

10. Enregistrez votre protocole en fermant la fenêtre.

Figure 17 : Feuille de consignes

Aide pour la navigation dans COPEX

Espace mission :

Vous y découvrez la description de la situation que vous avez à réaliser et toutes les consignes pour la mener à bien.

Espace ressources :

Pour votre situation, aucun document n'est disponible dans cet espace.

Espace résultats :

Pour votre situation, cet espace n'est pas accessible.

Espace publication :

Dans cet espace, vous trouverez deux outils nécessaires à la réalisation de la situation :

1. Un éditeur de texte qui fonctionne comme « Word ».

2. Un éditeur de dessin.

Espace protocole :

Dans cet espace se trouve l'éditeur de protocole. Vous allez l'utiliser pour écrire et organiser votre protocole.

Il est déjà structuré en grandes étapes (boîtes violettes) qui peuvent contenir des actions (boîtes bleues à rajouter).

Vous avez la possibilité de créer une nouvelle action (action libre) si celles proposées ne vous conviennent pas.

Sur la droite, vous trouvez la liste du matériel. Le nom et le type de chaque matériel est donné et si vous passez votre souris dessus, vous découvrez également une description de ce matériel.

Figure 18 : Feuille d'aide à la navigation

III. Analyse *a priori* de la situation

Dans le cadre de notre analyse *a priori*, nous allons reprendre les différents éléments du cadre théorique, que nous expliciterons à la lumière de la situation présentée ci-dessus.

1) Choix réalisés pour l'élaboration de la situation

Nous avons souhaité que ce travail soit individuel pour pouvoir diagnostiquer les conceptions de chaque élève participant à l'expérimentation. L'obtention de ces conceptions se fait par l'intermédiaire de l'élaboration d'une expérience qui permet la mobilisation des connaissances des élèves lors des phases de réflexion et de représentation comme nous l'avons vu dans le cadre théorique (Chapitre III.V.2). Cela passe par la réalisation de trois productions : un texte, un graphique et un protocole.

Deuxièmement, nous avons choisi de faire travailler les élèves sur ordinateur pour pouvoir utiliser le logiciel LabBook qui aide à l'élaboration d'une expérience. Cela nous permet également d'obtenir des traces informatiques et standardisées de l'activité de l'élève.

Un autre choix important est celui de la formulation de la question de départ posée que l'on retrouve dans les fiches de consigne distribuées aux élèves comme nous venons de le voir :

Comment modifier l'information génétique ?

Les termes choisis dans cette question découlent directement de l'analyse de la première étape de l'expérimentation et de l'analyse des programmes.

Nous avons élaboré la consigne donnée aux élèves sous la forme d'une question qui, utilise des termes neutres et faciles à comprendre pour les élèves.

Nous avons donc décidé de choisir le terme « information génétique » car c'est celui le plus rencontré en troisième et en seconde dans les programmes scolaires. Dans l'exercice utilisé pour tester les niveaux biologiques nous avons utilisé le terme « mutation ». Mais comme nous le verrons dans la partie « III.3)a. » de ce chapitre, le terme mutation a posé problème aux élèves par sa définition (ils ne la connaissaient pas) et par son lien trop important avec le terme génétique qui entraine les élèves vers le niveau biologique Gène. Nous voulions donc changer ce terme, et pour cela nous nous sommes appuyé sur d'Albaladejo (1988), qui affirme que les élèves donnent le sens de changement, de modification au terme mutation. Ce sont donc les termes de « modifier – modification », que nous avons choisi pour exprimer une action, sur l'information génétique, qui correspond à une mutation génétique mais sans orientation d'échelle.

La question est posée en ces termes à partir de la 2ème étape préliminaire. Pour résoudre ce problème, les élèves vont devoir se représenter le support et l'organisation de l'information génétique et donc mobiliser leurs connaissances sur le sujet. Nous pourrons alors les diagnostiquer par l'intermédiaire du modèle cK¢ dont les opérateurs (R) seront équivalents aux actions, par exemple, présentées par les élèves pour résoudre le problème comme nous le verrons dans la partie modélisation (partie IV de ce chapitre). Pour réaliser cette situation, les élèves auront à réaliser trois productions : un texte rassemblant leurs idées pour répondre à la question, un graphique et un protocole développant une des idées comme nous l'avons vu dans la présentation de la situation.

Deux autres choix sont également importants dans la situation. Le premier est le fait que les élèves ont déjà suivi, lorsqu'ils réalisent la situation, des enseignements concernant l'ADN (structure et fonction, et mutations). En réalisant notre situation après cet enseignement, nous souhaitons que les élèves aient une base commune de savoir (cet enseignement ayant lieu en seconde générale).

Un autre point abordé dans ce paragraphe sur les choix effectués lors de la construction de notre situation, est le fait que les élèves utilisent LabBook pour la première fois. Nous pensons que la prise en main de l'EIAH ne nécessite pas un apprentissage spécifique et que les explications fournies aux élèves sont suffisantes pour maîtriser les outils dont ils vont avoir besoin dans la situation. Nous pensons que nous avons prévu une durée de situation suffisamment longue (1^H) pour que tous les élèves puissent réaliser l'ensemble de la situation sans difficulté informatique.

L'ensemble de ces choix nous permet de proposer une situation que nous pouvons maintenant analyser du point de vue de la Théorie des Situations Didactiques.

2) Analyse *a priori* dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques

Les concepts de la Théorie des Situations Didactiques utilisés dans notre cas de diagnostic de conceptions sont : le contrat didactique, les variables didactiques et le milieu (définitions et explications données dans le Chapitre III.IV).

A. Le contrat didactique

Le contrat didactique se met en place entre les différentes personnes présentes lors de la situation. Dans notre cas, en dehors des élèves réalisant la situation, les individus présents sont les chercheurs et l'enseignant. Le contrat qui se met en place est donc différent de celui intervenant dans le cadre d'un enseignement classique et traditionnel. Il n'existe plus seulement entre l'enseignant et les élèves mais également entre les élèves et le(s) chercheur(s).

Ce contrat est influencé par différents facteurs qui permettent son élaboration. En premier, nous intervenons en période scolaire dans le lycée des élèves. Cela implique de leur part une attitude et un comportement habituels en milieu scolaire.

Ensuite, notre intervention est réalisée pendant les heures habituelles de SVT et tout est organisé par l'enseignant de SVT (la séance, l'information aux élèves, le lien avec le chef d'établissement, le lien avec les chercheurs). Les élèves s'attendent donc à « faire quelque chose » en SVT, même s'ils n'en connaissent pas la nature, l'objectif, ni l'organisation précise.

De plus, l'enseignant, même s'il n'intervient pas pendant la séance, est souvent présent lors de l'ensemble de la situation, ou au moins au début, dans la même salle que les élèves puis dans une salle à côté. L'enseignant reste la personne « administrativement » responsable vis à vis de l'établissement. Tous ces facteurs aident les élèves à décoder la situation qui leur est proposée et à anticiper les attentes des chercheurs vis-à-vis d'eux.

Mais le contrat est quand même différent de celui habituellement mis en place, car c'est le chercheur présent qui propose la tâche à réaliser. Il devient celui à qui sont destinées toutes les productions des élèves ainsi que leurs questions (concernant le logiciel, la situation, le problème à résoudre, les productions à effectuer, …).

De plus, l'enseignant ne regarde pas ce que les élèves sont en train de produire et il est bien précisé aux élèves que leur enseignant ne sera pas destinataire de leurs productions, même après la fin de la séance. Nous insistons sur le fait que tous les résultats proposés par les élèves, pour toutes leurs productions, ne seront ni notés, ni appréciés, ni jugés par l'enseignant, qu'elles ne rentreront pas dans leur évaluation scolaire. Bien sûr, nous leur indiquons le but de notre recherche, ainsi que, dans les grandes lignes, la façon dont leurs productions vont être analysées et utilisées dans notre recherche. Il sera également possible de leur communiquer nos résultats, s'ils le désirent.

Toutes ces précautions sont prises afin que les élèves se sentent libres dans leurs productions, par rapport à leur enseignant.

Pour accentuer ce sentiment de liberté face à la production de leurs réponses, si un élève demande si sa réponse est juste, la réponse du chercheur est que toutes les productions sont justes y compris celles qui peuvent être jugées scientifiquement incorrectes. Ce qu'un élève écrit nous convient toujours puisque nous cherchons à modéliser l'ensemble des conceptions.

Cependant, cette impression de liberté est mise à l'épreuve par le fait que la situation est réalisée en classe entière. Le regard des autres élèves face au comportement de chacun prend alors toute son importance. Même s'ils travaillent individuellement, les élèves font attention les uns aux autres, aux questions qu'ils posent, aux remarques éventuelles du chercheur sur leur production, à leur comportement lors de la réalisation de la situation. Tout peut être jugé et/ou interprété par leurs camarades, ce qui impose une certaine tenue, une attitude (répondre à la question même s'ils n'en ont pas envie, être attentif, …) car le

comportement et le regard des autres élèves leur renvoient des informations sur leur propre comportement.

L'ensemble de ces facteurs construit le contrat didactique qui, à notre avis, se met en place lors de la situation.

B. Les variables didactiques

Cette situation comprend un deuxième paramètre de la Théorie des Situations Didactiques que l'on peut décrire ici, il s'agit des variables didactiques. Ces éléments peuvent modifier la stratégie de résolution du problème chez les élèves. Les variables de notre situation sont présentes dans le tableau ci-dessous et seront explicitées par la suite.

Nom de la variable	Choix possibles	Choix réalisé
Elément graphique dans l'éditeur de graphique	Présence d'éléments classiques (cercle, carré, …)	Présence d'éléments classiques
	Présence d'éléments graphiques de forme biologique (hélice, croix, …)	
	Aucun élément graphique	
Niveau d'échelle biologique du protocole	Libre sans aucune indication	Imposé
	Libre avec l'ensemble des niveaux disponibles	
	Imposé	
Pré-structuration du protocole	Pré-structuration en deux étapes	Pré-structuration en deux étapes
	Pas de pré-structuration (vierge)	
Liste de verbes d'action	Liste de verbes imposés	Liste de verbes imposés

	Verbe libre	
Verbes d'action	Identiques à tous les niveaux	Identiques à tous les niveaux
	Différents entre les niveaux en fonction de la cohérence biologique	
	Différents entre les niveaux en fonction des synonymes	
Objets biologiques	Tous niveaux confondus	Spécifiques d'un niveau
	Spécifiques d'un niveau	
	Aucun objet biologique spécifié	
Structuration de l'action	Verbe + objet biologique	Verbe + objet biologique
	Libre	
Présentation du matériel technique	Sous forme de liste	Pas de présentation, matériel au libre choix de l'élève
	Pas de présentation, matériel au libre choix de l'élève	
Information sur chaque objet biologique dans la liste de matériel	Indication du support et d'une caractéristique	Indication du support et d'une caractéristique
	Indication du nom seulement	
	Indication du support + une illustration de l'objet	

Tableau 4 : Récapitulatif des variables avec les choix possibles, et ceux réalisés.

La première variable qui intervient dans la situation se trouve dans l'éditeur de dessin. Nous avons choisi de donner à l'élève des éléments classiques de dessin (cercle, carré, trait, …) afin de l'aider lors de la réalisation de son dessin. Nous faisons ce choix afin que ce ne soit pas un dessin entièrement réalisé à main levée. Mais cette aide est limitée et ne constitue qu'une base, contrairement à une aide possible qui aurait été de donner à l'élève des éléments graphiques de forme biologique (une hélice pour l'ADN, une croix pour le chromosome, …).

La deuxième variable est le niveau d'échelle biologique auquel nous allons placer l'élève lors de la production de son protocole. Le chercheur, après analyse des deux premières productions de l'élève décide du niveau auquel se situe l'élève et lui propose un environnement adapté à ce niveau dans l'éditeur de protocole. Cette orientation imposée conditionne ensuite de nombreux paramètres, ce qui n'aurait pas été le cas si le niveau n'avait pas été décidé par le chercheur.

Une fois le niveau biologique défini, nous avons donc décidé de fixer plusieurs autres paramètres de l'éditeur de protocole.

Tout d'abord, le protocole est pré-structuré par la présence de deux étapes nommées et dans lesquelles l'élève doit inclure des actions. Ces étapes sont :

1. Choisir le matériel à modifier
2. Modifier le matériel

Une alternative aurait été de ne proposer aucune étape et de ne pas aider les élèves dans la structuration de leur protocole. Le fait de proposer cette structuration oriente les élèves vers une certaine organisation des protocoles et des expériences que nous souhaitons qu'ils développent afin d'obtenir des productions standardisées.

Ensuite, les élèves ont à inclure des actions dans chacune des étapes. Ces actions sont soumises, elles aussi, à plusieurs pré-structurations.

La première pré-structuration mise en place pour l'action est le fait que l'on impose aux élèves de former leurs actions d'un « verbe d'action » et d'un « objet biologique ». Cela est utile pour obtenir une homogénéité dans l'apparence de leurs réponses. Cela permet également de répondre au fait qu'un protocole est une suite d'actions à réaliser. L'autre possibilité est de ne rien imposer pour la structuration de l'action, ce qui laisse alors un choix totalement libre à l'élève dans ce qu'il insère dans chaque étape. Nous avons laissé aux élèves la possibilité d'écrire une action libre, mais ce n'est pas la première solution qui leur est imposée.

Ensuite, le deuxième choix que nous avons fait est de proposer une liste de verbes définie aux élèves. En effet, ils ont à leur disposition cinq verbes et ils doivent en choisir un pour déterminer l'action à réaliser. Ces verbes sont tous identiques pour l'ensemble des niveaux biologiques : « modifier, ajouter, enlever, dupliquer, échanger ». Ils auraient pu être différents et notamment, nous aurions pu ne faire apparaître que ceux qui présentaient une cohérence biologique avec le niveau considéré, mais cela n'a pas été le cas. Une autre solution aurait aussi pu être de donner des synonymes différents à chaque niveau, pour différencier réellement les niveaux biologiques. Mais nous avons choisi de proposer les mêmes verbes pour l'ensemble des niveaux biologiques présents dans l'éditeur de protocole.

Une fois le verbe d'action choisi parmi ceux imposés, l'élève se voit soumettre une liste d'objets biologiques.

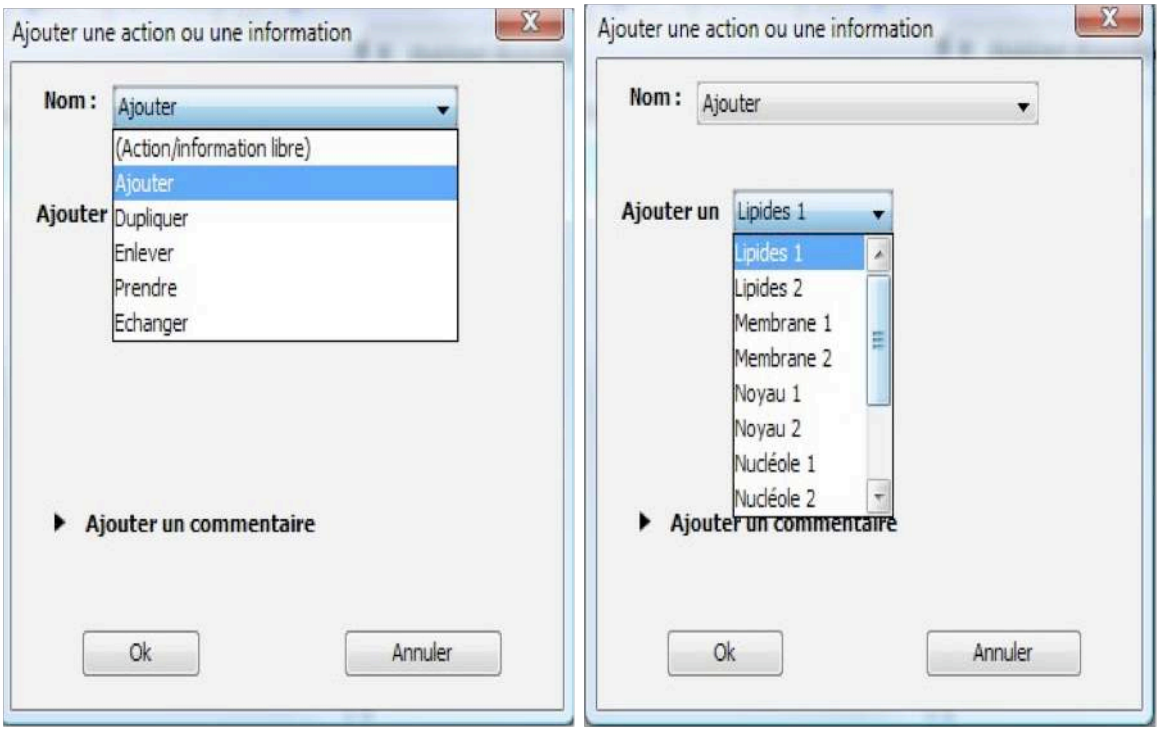


Figure 19 : Choix des verbes d'actions et du matériel biologique

Une fois de plus, il y a un choix qui a été fait et qui conditionne la réponse de l'élève. Les objets biologiques qui sont proposés à l'élève sont spécifiques de chaque niveau et donc différents en fonction du protocole ouvert. Nous avons réalisé ce choix pour ne pas laisser une liberté totale à l'élève dans le choix des objets, si aucune liste n'avait été présentée. Nous n'avons pas laissé le choix du matériel biologique à la charge de l'élève, car cela n'aurait pas été réaliste pour qu'ils réussissent, dans le temps imparti, à réaliser l'ensemble de la situation.

Une autre solution aurait été de leur fournir l'ensemble des objets biologiques de l'ensemble des niveaux. Mais dans ce cas, ils auraient pu changer d'idée, de niveau biologique, ce que nous ne souhaitons pas.

Une autre variable fixée concernant les actions, est la présentation des objets biologiques. En effet, ils sont proposés aux élèves sous forme de liste lors du choix de l'action, mais ils sont également présents, continuellement, à côté du protocole. Cette présence permet aux élèves d'obtenir plus d'informations car, lorsqu'ils passent la souris sur un des objets, ils peuvent obtenir des informations complémentaires sur l'objet biologique en question.

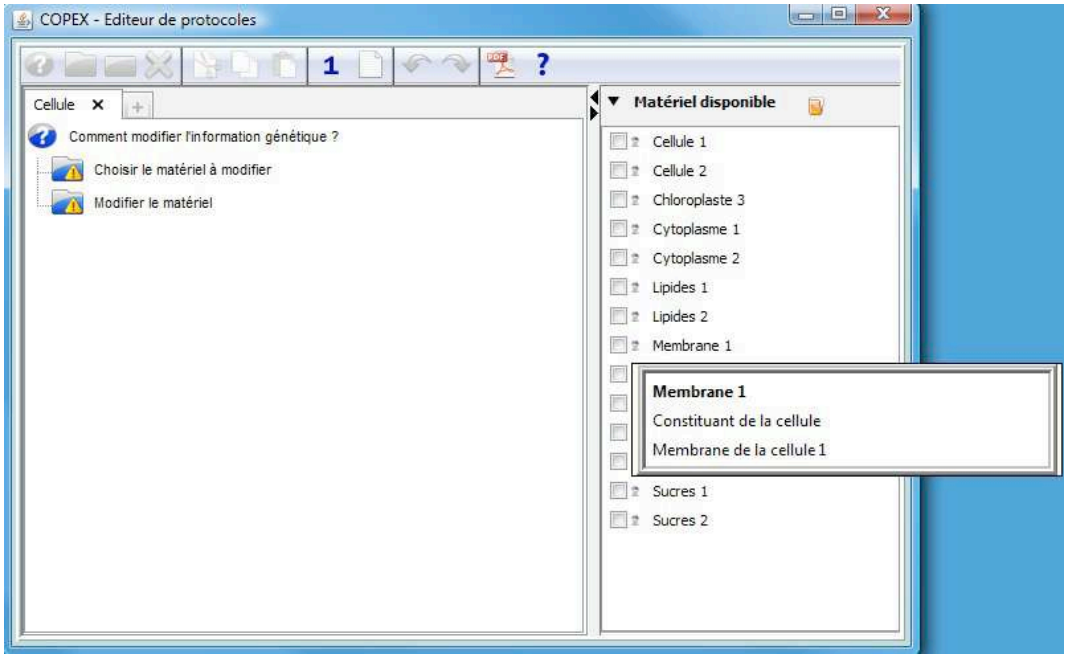


Figure 20 : Copie d'écran de l'éditeur COPEX au niveau Cellule (C) avec le détail d'un objet biologique : la membrane 1

Par exemple, l'élève peut prendre connaissance d'une des caractéristiques de l'objet, ou du lien qu'il a avec un autre objet. Cela peut l'aider dans son choix, le conforter une fois qu'il a choisi l'action à réaliser. Nous aurions pu n'indiquer que le nom de l'objet biologique, mais alors certaines informations auraient manqué, notamment pour différencier des objets comportant un numéro (cytoplasme 1 vs cytoplasme 2 ➔ cytoplasme de la cellule 1 vs cytoplasme de la cellule 2). Le fait de donner une description pour chacun permet d'homogénéiser la présentation du matériel biologique fourni.

Une autre solution aurait été de donner également une représentation graphique de l'objet, mais nous pensons que cela aurait été d'une trop grande aide pour les élèves. Nous voulions tout de même qu'ils suivent leur idée, sans se laisser influencer par ce que l'on pouvait leur fournir.

La dernière variable que nous avons décidé concerne le matériel technique. Aucune proposition ne leur a été faite à ce sujet car nous souhaitions les laisser libre de toute contraintes techniques. Ainsi, ils pouvaient tout réaliser et même inventer des techniques pour réaliser la modification de l'information génétique. Une alternative aurait pu être de proposer du matériel spécifique d'un niveau biologique, sous forme de liste. C'est-à-dire qu'il s'agit de matériel qu'il est nécessaire d'utiliser pour manipuler les objets biologiques de tel ou tel niveau. Ce n'est pas le choix que nous avons fait.

Sans la prise en charge de ces variables pour la production du protocole, nous pensons que des protocoles trop différents auraient été produits, entraînant des difficultés d'analyse. Les élèves auraient surtout eu plus de difficultés à concevoir leur protocole.

Ces différentes variables vont constituer le milieu qui va interagir avec les actions de l'élève lors de sa résolution du problème posé.

C. Le milieu

Les choix réalisés parmi les variables didactiques permettent de construire le milieu de la situation. Ce milieu est formé essentiellement des éléments proposés par le logiciel LabBook, dont les différents éditeurs, avec lesquels l'élève va interagir (description du logiciel dans le Chapitre III.VI.2).

C'est ce logiciel, ainsi que le chercheur présent lors de l'expérimentation, qui vont fournir à l'élève les éléments de la situation lors de l'utilisation du logiciel dans le but de répondre au problème.

L'influence du chercheur, dont le rôle est déjà décrit ci-dessus dans le cadre du contrat didactique, est concrétisée par des rétroactions ayant essentiellement pour but d'aider les élèves à manipuler et à naviguer dans le logiciel dont ils ne connaissent pas les fonctionnalités avant la séance.

LabBook est un élément du milieu organisé en cinq espaces : exploration, protocole, résultats, publication et mission. La principale adaptation du milieu est l'orientation, par le chercheur, vers un protocole spécifique, et ce à partir des productions de l'élève.

Ainsi, la rétroaction provient de l'action de l'élève et va être différente en fonction des stratégies qu'il a décidé d'adopter.

L'organisation de ce site web comporte également des contraintes lors de son utilisation. Une première contrainte est le fait que les productions sont demandées aux élèves dans un certain ordre : texte des idées, dessin puis protocole. L'accès à l'éditeur de protocole ne peut se faire qu'une fois les deux premières productions réalisées et enregistrées. De plus, l'accès à cet éditeur est encore limité par le fait que l'élève a besoin de faire appel au chercheur pour obtenir la lettre du protocole à ouvrir.

L'ensemble de ces propositions, adaptations et moyens mis à disposition des élèves caractérise et définit le milieu didactique de la situation mise en place. Afin de construire cette situation, nous avons eu besoin, en plus de choisir son cadre théorique, d'analyser le problème posé.

3) Liens entre le problème posé et le savoir scolaire

Le problème posé aux élèves porte sur la modification de l'information génétique. Si nous l'analysons du point de vue scientifique, nous constatons que le développement de la réponse nécessite, de la part des élèves, une analyse de la question sur l'action de modification et le concept d'information génétique.

A. Analyse du problème biologique

Le problème global renvoie à un ensemble d'éléments de réponses possibles :

- Il est impossible de modifier simultanément l'information génétique de toutes les cellules d'un être vivant pluricellulaire, qu'il soit autotrophe ou hétérotrophe.

- Chez un être vivant pluricellulaire chaque cellule contient la même information génétique. Cette information qui va s'exprimer différemment en fonction du tissu dans lequel se trouve la cellule. En effet, chez les être vivants pluricellulaires, les cellules vont subir une différenciation au début de leur vie ce qui va induire une fonction différente pour chaque type de cellules insérée dans un tissu (par exemple chez certains animaux : tissu nerveux, tissu musculaire, tissu digestif, tissu épidermique, …).
- Des modifications spontanées de l'information génétique se produisent en permanence dans les cellules, mais elles sont réparées aussi spontanément par des processus de réparation cellulaire prévus à cet effet. Si elles ne sont pas spontanément réparées, les cellules modifiées sont détruites par le phénomène de l'apoptose.
- Dans le cas de certaines maladies comme les cancers, les processus de réparation et/ou de mort programmée des cellules (apoptose) ne fonctionnent plus et les cellules dont l'information génétique est modifiée se multiplient spontanément et en grand nombre avec leurs « erreurs ». Les modifications sont donc transmises entre les générations de cellules.
- La thérapie génique vise à remplacer ou complémenter un allèle mutant, défectueux par un allèle fonctionnel ou à sur-exprimer une protéine dont l'activité aurait un impact thérapeutique. Cette technique de modification fait encore l'objet de recherche et n'est pas opérationnelle pour toutes les « maladies ».
- Il est également possible de modifier l'expression de l'information génétique d'un être vivant pluricellulaire quand il est au stade unicellulaire, c'est-à-dire juste après la rencontre des gamètes lors de la fécondation. Cela est possible par différentes techniques de génie génétique (clonages, introduction de plasmides, transgénèse,…).

Les élèves de seconde ne connaissent pas les mécanismes de réparation spontanée du génome, ils n'ont pas non plus de notion de génie génétique, ni de connaissances sur la synthèse des protéines.

Par rapport au problème posé, ils sont capable de dire que la modification est portée par l'ADN, car il savent que c'est le support de l'information génétique et qu'il peut, associé à des protéines, prendre plusieurs formes : chromosome (chromatine sous forme condensée) ou chromatine libre dans le noyau. Ils sont capables de faire la différence entre un être vivant unicellulaire et pluricellulaire. Ils savent que toutes les cellules d'un être vivant pluricellulaire contiennent la même information génétique. Ils ont la notion de différenciation cellulaire. Ils peuvent aussi évoquer les OGM vus en classe, le clonage, les thérapies géniques qui sont largement médiatisés.

L'ensemble des connaissances qu'ils peuvent mobiliser et qui sont nécessaires pour répondre au problème, sont regroupées dans le paragraphe suivant.

B. Connaissances nécessaires

Les connaissances nécessaires correspondent aux connaissances que possèdent les élèves d'après l'enseignement qu'ils ont suivi et qui sont requises pour répondre au problème. Plusieurs réponses sont possibles et acceptables d'un point de vue biologique. En effet, l'ADN est le support biologique de l'information génétique à proprement parler. C'est donc en agissant sur lui, sur son organisation, en créant des mutations génétiques que l'on peut modifier l'information génétique. Mais l'ADN étant une succession de nucléotides, le gène une grande séquence de nucléotides et le chromosome de l'ADN super–enroulé associé à des protéines, on peut alors modifier l'information génétique en agissant sur eux. D'après l'enseignement que les élèves ont reçu l'année précédente, l'ADN est le support reconnu de

l'information génétique et les modifications de l'information génétique se font sur sa structure. La réponse optimale que nous attendons se trouve donc à niveau-là.

Nous pouvons ainsi formuler ces connaissances, adaptées au niveau de début de classe de première des élèves participant à cette étude :

- L'information génétique est portée par l'ADN.
- L'ADN peut être considéré comme une succession de gènes et forme des chromosomes dans son état super enroulé. Il se trouve dans le noyau des cellules eucaryotes ou dans le cytoplasme des cellules procaryotes.
- Une molécule d'ADN est constituée de bases, de sucres et de phosphates.
- Les bases sont au nombre de quatre : A-T-C-G et sont appariées deux à deux (A-T), (C-G).
- L'écriture et la lecture de ces bases forment le code génétique universel.
- L'ordre et la succession des bases de l'ADN définissent le programme génétique d'un organisme.
- Le programme génétique d'un organisme le caractérise et comprend toutes les informations nécessaires à sa vie, sa survie et sa croissance.
- Ce sont les bases qui sont les principaux éléments concernés lors d'une modification de l'information génétique.
- Une modification de l'information génétique se situe au niveau de la molécule d'ADN et entraîne une modification de sa structure, de l'ordre de ses bases.
- Une modification de l'information génétique peut être une délétion, un ajout, une duplication ou une substitution d'une ou plusieurs paires de bases nucléotidiques.
- Une modification de l'information génétique peut se traduire par une expression phénotypique différente de celle de l'organisme non-modifié (échelle de la cellule pour un être unicellulaire et de l'individu pour un être pluricellulaire).

Ces connaissances peuvent être séparées en quatre catégories :

- la localisation (niveau d'échelle biologique) de l'information génétique,

- la fonction de l'information génétique,

- la structure (forme et organisation interne),

- la modification de l'information génétique ou de son expression.

Ainsi, certaines de ces connaissances sont en lien avec la localisation de l'information génétique : « l'ADN est le support de l'information génétique et se trouve dans le noyau des cellules eucaryotes ». D'autres correspondent plus à la structure globale de l'information génétique : présence de sucres, phosphates et quatre bases dans la molécule d'ADN. Pour ce qui concerne l'organisation de la structure de l'information génétique au niveau ADN, ce sont les connaissances comme la succession des bases formant le programme génétique et leur organisation par paires qui font parties de cette catégorie. Les connaissances sur le fait que le code génétique détermine les caractères d'un individu sont quant à elles liées à la fonction de l'information génétique. Enfin, d'autres connaissances impliquent les modifications de l'information génétique : « une modification se situe au niveau des bases ».

On peut également remarquer que certaines connaissances n'appartiennent pas exclusivement à une catégorie mais à plusieurs. Cela représente bien le fait que si les élèves ne possèdent pas de connaissances dans une des catégories, cela peut induire le risque de limiter les connaissances d'une autre catégorie. Il est donc nécessaire qu'ils possèdent et maitrisent l'ensemble de ces connaissances pour comprendre le problème et y répondre avec le plus de facilité et de façon la plus complète possible.

L'étude du problème de notre situation en lien avec le savoir scolaire, nous a permis d'identifier les connaissances nécessaires pour répondre au problème. Bien que la réponse optimale se situe au niveau ADN, l'enseignement de la génétique a permis aux élèves de développer des connaissances sur neuf niveaux biologiques. Ces niveaux biologiques sont impliqués en génétique et peuvent correspondre aux niveaux sur lesquels les élèves veulent modifier l'information génétique.

4) Objets biologiques et modification de l'information génétique sur les neuf niveaux biologiques

L'identification de ces neuf niveaux biologiques a nécessité la mise en place d'une première étape d'expérimentation afin de vérifier que les élèves français ont, eux aussi, des difficultés avec la notion d'emboîtement des différents niveaux biologiques.

A. Détermination du nombre de niveaux biologiques

L'étude de la littérature internationale présentée dans le chapitre II, nous a montré que les élèves de différents pays ont du mal à localiser l'information génétique au sein de la hiérarchie des objets et niveaux biologiques. Nous voulons donc vérifier si les élèves français ayant un niveau de seconde générale, rencontrent aussi ces difficultés dans le contexte particulier de l'élaboration d'une expérience.

Pour cela, nous avons souhaité proposer aux élèves une première situation dans laquelle un certain nombre de niveaux biologiques peut intervenir, afin d'identifier ces niveaux pour ensuite les modéliser. Cette première étape a fait l'objet d'un article de conférence présenté à l'ARDIST 2009 (Chapel, Marzin, 2009).

a) Construction de la première partie de l'expérimentation

La première étape de notre expérimentation s'est déroulée à l'automne 2008 avec 102 élèves de seconde générale âgés de 16-17 ans. Ils faisaient partie de deux lycées différents et étaient répartis dans quatre classes de seconde auprès de trois enseignants.

Les élèves avaient une dizaine de minutes pour réaliser l'exercice présenté ci-dessous et le rendre ensuite aux chercheurs avant de continuer le cours avec l'enseignant.

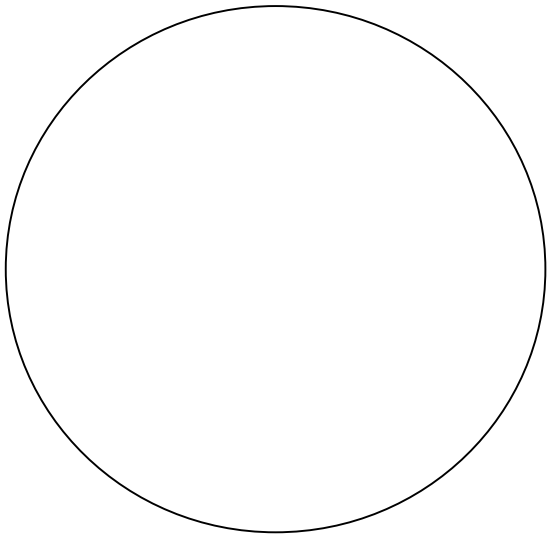
Les élèves travaillaient individuellement, il n'y a pas eu d'interaction, ni de communication entre eux. Ce sont donc leurs productions écrites (texte et dessin) qui ont été récoltées pour être ensuite analysées.

Une cellule est soumise à un rayonnement.

A la suite de cette exposition, les scientifiques disent que cette cellule est mutée.

Où, selon vous, le rayonnement agit-il ?

Utilisez le schéma et le texte ci-dessous pour répondre à cette question. (Vous pouvez représenter les rayons, le ou les lieu(x) où ils agissent...)



Cellule

_____
_____
_____
_____
_____
_____

Figure 21 : Enoncé de la première étape de l'expérimentation

Pour construire l'énoncé de cette première partie et analyser les réponses des élèves, nous avons prédéfini six niveaux à partir des précédentes études dégageant plusieurs niveaux. Dans ces études, nous pouvons retrouver différentes classifications des niveaux biologiques impliqués en génétique, comme celle de Bahar, Johnstone et Hansell (1999) : Macro – Micro et Symbolique, ou celle de Marbach-Ad et Stavy (2000) : Macroscopique – Microscopique et Moléculaire. Nous avons souhaité préciser un peu plus ces niveaux d'échelle.

Nous nous sommes donc appuyés sur l'analyse effectuée à propos du savoir de référence pour spécifier les niveaux présents en génétique et déterminer pour chacun d'eux un objet biologique de référence qui lui donnera son nom. Nous avons ainsi défini six niveaux biologiques : Organisme – Cellule – Noyau – Chromosome – Gène – ADN.

Le problème qui permet d'obtenir des réponses possibles à tous ces niveaux doit mettre en jeu la localisation de l'information génétique. La notion de mutation génétique fait appel à cette idée sans indiqué de niveaux biologiques.

Dans cet énoncé, des choix concernant l'énoncé ont été faits. Seuls les mots « mutation » et « mutée » sont présents, nous avons enlevé le terme « génétique » pour diminuer le risque d'étayage vers le niveau Gène.

Ensuite, nous avons demandé aux élèves de représenter graphiquement leur réponse, et de la compléter par un texte explicatif. Les zones de graphique et de texte sont clairement séparées. La zone de texte comprend des lignes et la zone de graphique un cercle représentant une cellule (le mot cellule étant écrit à côté) afin de faciliter leurs dessins et leur donner une amorce.

Le dernier point concerne l'agent mutagène choisi. Il s'agit d'un rayonnement. Le type de ce rayonnement n'est pas spécifié (UV, IR…) pour ne pas orienter les élèves mais l'indication que la mutation est d'origine extérieure à la cellule permet aux élèves de dessiner le rayonnement, de dessiner ce qui provoque la mutation et ainsi de cibler l'endroit où un agent mutagène peut agir.

L'ensemble des productions a été analysé avec des grilles d'analyse que nous avons construites.

b) Méthodologie de test et de l'analyse des productions

Afin d'analyser les productions des élèves, nous avons décidé de classer leurs réponses en huit catégories. On retrouve les six niveaux prédéfinis : Organisme – Cellule – Noyau – Chromosome – Gène et ADN. Une catégorie « autres » regroupent toutes les réponses ne correspondant pas un niveau prédéfini et une catégorie « pas de réponse » regroupe les élèves qui n'ont pas répondu à l'exercice.

Pour classer les réponses des élèves, nous avons considéré en premier leurs réponses écrites (zone de texte), le schéma servant ensuite à clarifier et/ou conforter la réponse de chaque élève. La méthodologie complète d'analyse est présente en Annexe II.

La somme des réponses des élèves pour chaque niveau nous permet de comparer les fréquences d'apparition de chaque niveau et de confirmer cinq des six niveaux définis à partir des analyses effectuées auparavant et de la littérature. Le niveau Organisme ne présente aucune réponse de la part des élèves, mais c'est sûrement dû à l'exercice qui propose un schéma à compléter sur lequel est représentée une cellule. Il est donc difficile pour les élèves d'imaginer un effet à un niveau supérieur, comme le niveau Organisme. L'ensemble des cinq autres niveaux est retrouvé même si la répartition des réponses entre eux n'est pas uniforme. Nous pouvons ainsi constater que trois d'entre eux ont une fréquence plus importante : Cellule, Noyau et ADN.

Le niveau Chromosome se distingue des autres puisqu'il ne possède qu'une seule réponse. C'est un résultat à approfondir, que nous ne comprenons pas étant donné que cette notion a été étudiée l'année précédente. Nous avons constaté que 15% des élèves citent ce niveau et le font apparaître sur leur dessin. En réalité, quand ils citent le niveau Chromosome, les élèves ne s'arrêtent pas à ce niveau, ils continuent leur explication vers un niveau inférieur, ce qui provoque une classification de leur réponse dans une des catégories inférieures.

L'ensemble de ces résultats confirme la présence de cinq niveaux biologiques (Cellule, Noyau, Chromosome, Gène et ADN), mais nous avons décidé de garder les six niveaux

biologiques prédéfinis en raison du biais produit par le schéma concernant le niveau Organisme. Des niveaux supplémentaires sont à intégrer dans la situation finale puisqu'ils apparaissent dans les productions des élèves. Ils correspondent aux niveaux : Milieu, Organe et Caryotype.

Cette étape nous apporte également des informations sur les niveaux testés. Comme plusieurs réponses sont acceptées pour chaque niveau, il nous semble plus judicieux, pour obtenir un meilleur diagnostic, de préciser chacun d'eux par les différents objets biologiques qui les caractérisent. Ainsi, nous pourrons réaliser une modélisation sur plus de niveaux et avec plusieurs conceptions possibles par niveau, une conception par objet biologique.

Cette première étape nous a permis de vérifier que les élèves français ont également des difficultés avec les niveaux biologiques impliqués en génétique ainsi qu'avec les liens qui existent entre eux. À partir de cet exercice, nous allons pouvoir modéliser l'ensemble de ces niveaux, ceux validés et ceux que nous souhaitons développer afin de concevoir la situation de diagnostic des conceptions.

c) Objets biologiques et modification de l'information génétique sur six niveaux évalués et trois ajoutés

L'analyse de la première étape nous apporte des précisions sur les niveaux nous avions prédéfinis. Nous avons décidé d'en rajouter trois, des niveaux intermédiaires, car ils apparaissent dans les productions des élèves. Ces niveaux supplémentaires sont Milieu, Organe et Caryotype et complètent la liste des six évalués dans la première étape. Nous pouvons ainsi proposer neuf niveaux biologiques dans la deuxième étape et la situation finale : Milieu - Organisme – Organe – Cellule – Noyau – Caryotype - Chromosome – Gène et ADN. Ces neuf niveaux correspondent aux niveaux biologiques possibles et utilisables par les élèves pour répondre au problème posé.

Nous allons les présenter l'un après l'autre en détaillant pour chacun les objets biologiques présents et leurs caractéristiques. À chaque niveau, les objets biologiques correspondent aux différents supports du niveau que pourrait avoir l'information génétique pour les élèves et donc sur lesquels ils peuvent agir pour la modifier. Nous pouvons constater que ces niveaux portent les noms d'objets biologiques. C'est dû au fait que chaque objet principal d'un niveau lui donne son nom. Afin de les différencier dans ce manuscrit, nous écrirons le nom du niveau avec un majuscule et celui de l'objet avec une minuscule. Ainsi nous obtenons le niveau « Chromosome » qui contient l'objet biologique « chromosome ». Ces niveaux ont également des caractéristiques distinctes. Ces caractéristiques peuvent s'appliquer soit au niveau en général, soit plus particulièrement à un des objets de ce niveau, soit aux deux.

La modification de l'information génétique peut, elle aussi, varier. En effet, plusieurs actions sont possibles. Si l'on reprend le savoir scolaire sur les mutations, nous avons choisi d'utiliser quatre verbes peuvent être utilisés : Ajouter (le même type de matériel, mais sans équivalence) – Enlever – Dupliquer - Echanger. Ces verbes correspondent à des actions précises mais peuvent être rassemblés sous un seul verbe qui est le verbe Modifier. Il représente l'action généraliste de modifier mais sans détailler le mode d'action. Ainsi nous obtenons cinq verbes d'action pour modifier l'information génétique et nous pouvons les appliquer à tous les objets biologiques dans le cadre de notre modélisation.

Nous proposons une représentation de ces niveaux sous forme de cartes conceptuelles réalisées avec le logiciel Cmap. Ces Cmap sont des représentations des niveaux biologiques et de leurs objets biologiques associés. Sur chacun de ces objets, les cinq verbes d'action, pour modifier l'information génétique, ont été associés afin d'envisager toutes les combinaisons possibles. Les caractéristiques des objets biologiques, des niveaux ainsi que les conséquences des actions ont été introduites. Seules les conséquences du niveau considéré dans la Cmap sont présentes même si les actions induisent des conséquences à

des niveaux supérieurs. Ces conséquences ne sont pas tout le temps correctes biologiquement parlant, ni réalistes mais nous avons décidé de donner une conséquence à chaque action de façon systématique pour que la modélisation soit complète par la suite. Ainsi, parmi ces conséquences, certaines sont également établies comme des généralités alors qu'elles n'en sont pas, d'autres non aucune crédibilité biologique mais nous pensons qu'elles peuvent correspondre à la pensée de l'élève en réponse à une action.

Sur ces cartes conceptuelles, le dernier cadre des caractéristiques du niveau est toujours une connaissance en lien avec le niveau biologique inférieur, par exemple, dans la Cmap Cellule, nous trouverons comme dernière caractéristique, que la cellule contient un noyau. Ainsi nous enchainons sur le niveau biologique Noyau.

Ces cartes conceptuelles vont être utiles lors de la modélisation de la situation avec cK¢ car nous utiliserons les actions possibles sur les objets biologiques des différents niveaux pour déterminer les opérateurs possibles (R). De plus, les caractéristiques des objets biologiques ainsi que du niveau auquel appartiennent ces objets et les conséquences des actions seront utilisées pour la construction des contrôles (∑) dans le modèle cK¢.

Nous avons réalisé deux séries de Cmap. La première série de Cmap est basée sur l'analyse du savoir scolaire. Elles permettent de construire les protocoles dans COPEX en proposant aux élèves tous les choix possibles de matériels et d'actions, même si certains ne sont pas biologiquement corrects, réalistes ou respectant l'éthique. Une seule Cmap sera présentée ici, celle du niveau Noyau, les autres sont placées dans l'Annexe III.

Le premier niveau biologique est le niveau Milieu. Les paramètres environnementaux constituent le premier objet biologique de ce niveau. Le deuxième est le milieu en lui-même sur lequel nous pouvons agir dans son ensemble.

Le deuxième niveau est celui de l'Organisme. Dans ce niveau, le support de l'information génétique peut être l'organisme en lui-même ou son enveloppe ou son contenu. Chacun de ces support possibles peut être modifié.

Nous trouvons ensuite le niveau Organe qui comprend plusieurs objets biologiques qui sont l'organe lui-même, l'enveloppe de l'organe et le contenu de l'organe. L'information génétique, dans ce niveau, peut être portée par chacun de ces objets biologiques. Ce sont ces supports qui peuvent être modifiés.

Ces trois niveaux sont visibles à l'œil nu et peuvent être rassemblés sous le terme « niveaux macroscopiques ».

La cellule est le premier objet biologique du quatrième niveau qui comporte huit autres objets : la membrane cellulaire, les constituants de cette membrane qui sont différenciés en protéines, lipides et sucres et le contenu cellulaire que l'on peut diviser en cytoplasme et organites cellulaires.

L'ensemble de ces constituants ainsi que la cellule dans son entier et son enveloppe peuvent servir de support à l'information génétique et être modifiés par les élèves dans le protocole qu'ils créent.

Le cinquième niveau est le niveau Noyau. Les objets biologiques de ce niveau sont : le noyau, son enveloppe, son contenu, le nucléoplasme et le nucléole. De nouveau, chacun des objets biologiques présent dans ce niveau peut être le support de l'information génétique pour les élèves et donc être modifié. La carte conceptuelle du niveau Noyau est

prise en exemple dans ce manuscrit pour illustrer la représentation graphique de tous les niveaux présentés.

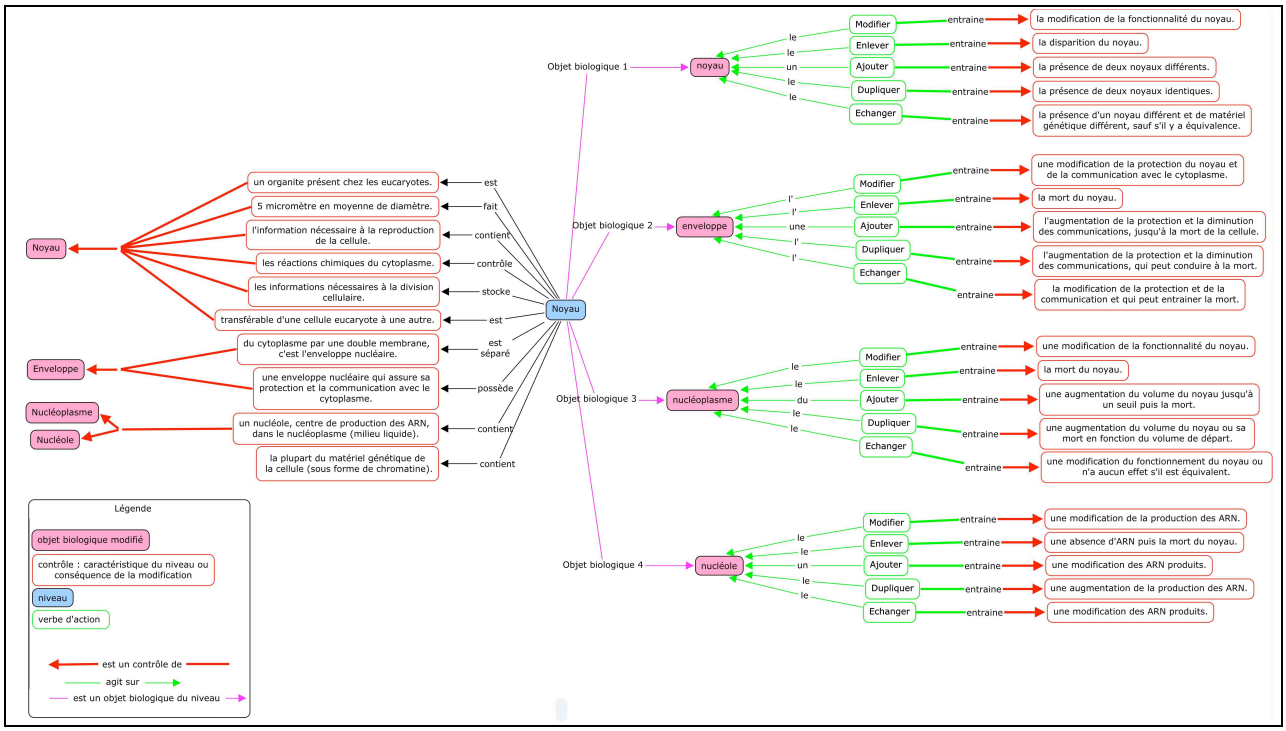


Figure 22 : Résolution possible du problème au niveau Noyau

Ces deux niveaux sont regroupés sous le terme de niveaux cellulaires, observables au microscope optique.

Le sixième niveau biologique, le Caryotype, comprend deux paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour modifier l'information génétique : l'ordre et le nombre de chromosomes.

Le chromosome caractérise le septième niveau et fait partie des objets biologiques. Les chromatides, le centromère ou le bras du chromosome peuvent également porter l'information génétique. Il est alors possible d'agir sur eux pour la modifier.

De nouveau nous pouvons unir ces niveaux sous le terme Ultracellulaire. Ils sont accessibles par le microscope optique ou électroniques.

Le huitième niveau comprend les objets biologiques suivants : le gène, le promoteur du gène, le corps du gène et la terminaison du gène sur lesquels on va pouvoir agir pour modifier l'information génétique.

L'ADN correspond au neuvième et dernier niveau biologique. Ses objets biologiques sont l'ADN, les nucléotides, les phosphates et les sucres qui le constituent. Il est aussi possible d'agir sur la molécule, sa structure en hélice et ses brins complémentaires.

Le Gène et l'ADN correspondent aux niveaux Moléculaires, qui sont des niveaux accessibles principalement par l'imagination.

Les niveaux biologiques qualifiés de cellulaires, ultracellulaires et microscopiques, peuvent également être regroupés sous le terme microscopique.

Ces neuf niveaux biologiques contiennent tous des objets biologiques distincts et ont leurs propres caractéristiques, ils sont connectés les uns aux autres.

Grâce aux représentations de ces niveaux sous forme de cartes conceptuelles, nous représentons l'emboîtement des neuf niveaux que nous proposons. Ils fonctionnent comme des poupées russes, la première contenant toutes les autres. Au fur et à mesure que nous ouvrons une poupée (un niveau biologique), nous allons vers un niveau plus petit et plus détaillé. Il serait même possible d'aller encore plus bas que ce que nous présentons, mais cela ne correspond pas aux programmes de SVT déjà abordés par les élèves.

Dans la deuxième série de Cmap Nous avons également enlevé toutes les actions qui ne sont pas réalistes biologiquement parlant (« échanger l'enveloppe de deux organismes ») ou qui ne respectent pas l'éthique (manipulation d'êtres vivants).

Cette deuxième série nous permet de faire des hypothèses sur les résultats qui vont d'apparaître. Mais l'analyse des résultats sera réalisée à partir de la première série pour n'omettre aucune possibilité. Afin de pouvoir comparer ces deux séries de Cmap, la Cmap du niveau Noyau est de nouveau présentée avec, cette fois-ci, toutes les actions non correctes, non éthiques et non réalistes enlevées. Les autres Cmap se trouvent dans l'Annexe IV. Les légendes sont identiques pour l'ensemble des Cmap, qu'elles soient issues de l'analyse du savoir et présentes toutes les possibilités d'actions ou qu'elles soient modifiées.

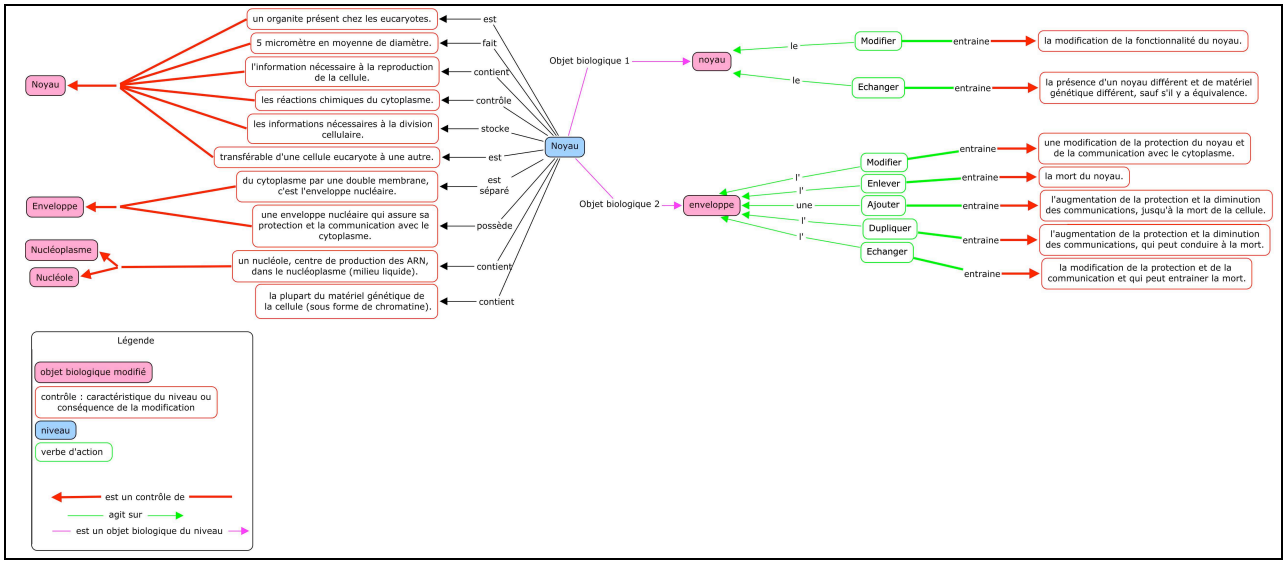


Figure 23 : Résolution possible au niveau Noyau, adaptée au niveau seconde

Nous proposons de modéliser les conceptions des élèves sur la modifications de l'information génétique en nous appuyant sur le modèle cK¢ (Balacheff, 1995) que nous avons adapté.

IV. Modélisation

Comme nous l'avons expliqué dans notre analyse *a priori*, nous utilisons le modèle cK¢ de Balacheff (1995) afin de formaliser les conceptions des élèves sur l'information génétique.

Nous avons ainsi construit un tableau reprenant les neuf niveaux biologiques obtenus ainsi que les cinq verbes d'action possibles sur l'information génétique et nous les avons définis selon les paramètres du modèle :

> « - P est un ensemble de problèmes (…) ;
>
> - R est un ensemble d'opérateurs ;
>
> - L est un système de représentation, il permet d'exprimer les éléments de P et de R ;
>
> - Σ est une structure de contrôle » (Balacheff, 1995, p.224).

L'adaptation que nous proposons intègre les éléments ci-dessous. Pour chaque niveau, nous retrouvons donc plusieurs objets biologiques qui correspondent aux objets que les élèves peuvent considérés comme étant le support de l'information génétique et donc qu'ils peuvent modifier. Ces objets biologiques sont les mêmes que les « objets biologiques modifiés » des Cmap construites.

Nous appliquons ensuite nos cinq « verbes d'action » sur ces objets biologiques comme nous l'avons déjà vu dans les Cmap. Une action sur un objet biologique est alors considérée, selon notre adaptation du modèle cK¢, comme un opérateur (R) dans le registre de représentation (L) « texte ». Enfin, les éléments qui garantissent la cohérence de ces opérateurs sont des contrôles (Σ) que l'on peut retrouver également dans les Cmap. Ce sont soit des caractéristiques de l'objet biologique (Σ^1) ou du niveau considéré, soit un conséquence de la modification (Σ^2).

Dans ce tableau, nous retrouvons aussi le système de représentation graphique, car nous demandons aux élèves de réaliser un schéma. Pour ce système-là, les opérateurs sont des représentations graphiques types des objets biologiques, elles sont décrites textuellement dans notre modélisation.

On obtient ainsi, pour chaque niveau, un tableau qui comprend les différents éléments présentés, comme dans l'exemple du niveau ADN ci-dessous.

Niveau	Objet biologique	Système de représentation (L)	Opérateur (R)	Contrôle 1 (Σ^1)	Contrôle 2 (Σ^2)
ADN	ADN	Texte	Modifier / Changer l'ADN	L'ADN est le support de l'information génétique de tout organisme. Il contient l'ensemble des informations nécessaires au développement et à la survie d'un organisme.	La modification de l'ADN entraîne une modification de l'information génétique.
			Enlever / Détruire l'ADN		L'absence d'ADN entraîne une perte de l'information génétique.

			Ajouter l'ADN	C'est le support de l'hérédité. Il est transférable à tous les organismes.	L'ajout d'ADN entraîne la cohabitation de deux informations génétiques différentes.
			Dupliquer l'ADN		L'ajout d'ADN entraîne la cohabitation de deux informations génétiques identiques.
			Echanger l'ADN		L'échange de l'ADN entraîne un changement de l'information génétique.
	Nucléotide		Modifier / Changer un nucléotide	L'ADN est un message qui correspond à une succession ordonnée de quatre nucléotides : ATCG qui forment le code génétique universel. Les nucléotides sont appariés deux à deux : A-T et G-C. La succession ordonnée des nucléotides forme le programme génétique d'un individu.	La modification d'un nucléotide entraîne une modification du message, de l'écriture symbolique de l'information génétique.
			Enlever / Détruire un nucléotide		
			Ajouter un nucléotide		
			Dupliquer un nucléotide		

			Echanger un nucléotide		
	Sucre		Modifier / Changer un sucre	L'ADN est formé, en plus des bases, de sucres et de phosphates.	La modification d'un sucre entraîne un changement de la structure et une inactivation de la molécule.
			Enlever / Détruire un sucre		L'absence d'un sucre entraîne la rupture de la molécule et son inactivation.
			Ajouter un sucre		L'ajout d'un sucre entraîne une modification de la structure de la molécule et son inactivation.
			Dupliquer un sucre		
			Echanger un sucre		L'échange d'un sucre n'a pas de conséquence, s'il est identique.
	Phosphate		Modifier / Changer un phosphate		La modification d'un phosphate entraîne une modification de la structure et une inactivation de la molécule.
			Enlever / Détruire un phosphate		L'absence d'un phosphate entraîne la rupture de la molécule et son inactivation.

			Ajouter un phosphate		L'ajout d'un phosphate entraîne une modification de la structure de la molécule et son inactivation.
			Dupliquer un phosphate		
			Echanger un phosphate		L'échange d'un phosphate n'a pas de conséquence.
	Brin d'ADN		Modifier / Changer un brin	Une molécule d'ADN est formée de deux brins complémentaires : codant et non codant.	Une modification d'un brin de la molécule entraîne une modification des informations portées par la molécule.
			Enlever / Détruire un brin		L'absence d'un brin entraîne la formation du brin complémentaire, si c'est le brin non-codant qui est enlevé.
			Ajouter un brin		L'ajout d'un brin entraîne la formation d'une hélice à trois branches et l'inactivation de la molécule.
			Dupliquer un brin		

			Echanger un brin		L'échange d'un brin entraîne la formation d'une molécule à deux brins non complémentaires, et l'inactivation de la molécule.
	Molécule d'ADN		Modifier / Changer la molécule	L'ADN est une molécule tridimensionnelle, présente dans toutes les cellules vivantes.	La modification de la molécule entraine une modification de l'ADN et de son information.
			Enlever / Détruire la molécule		L'absence de la molécule entraine l'absence d'ADN.
			Ajouter une molécule		L'ajout d'une molécule entraine la présence de deux molécules d'ADN non identiques et la présence de deux informations différentes.
			Dupliquer la molécule		La duplication de la molécule entraine la présence de deux molécules identiques.
			Echanger la molécule		L'échange de la molécule entraine la disparition de l'information d'origine et l'apparition d'une nouvelle information génétique.
	Hélice d'ADN		Modifier / Changer l'hélice	L'ADN est une double hélice.	La modification de l'hélice entraine une modification de l'information génétique portée.

			Enlever / Détruire l'hélice		L'absence d'hélice entraine une perte de l'information génétique.
			Ajouter une hélice		L'ajout d'une hélice entraine l'apparition d'une nouvelle information en plus de l'ancienne.
			Dupliquer l'hélice		La duplication de l'hélice entraine la présence de deux informations identiques.
			Echanger l'hélice		L'échange de l'hélice entraine la disparition d'une information génétique et l'apparition d'une nouvelle.
		Graphique	Une double hélice avec des traits indiquant la place des nucléotides	L'ADN est une double hélice qui porte les nucléotides appariés deux à deux.	
			Un schéma avec des boules et des bâtons marqués : S-P-B	L'ADN est une succession de Sucres, Phosphates et Bases.	
			Une molécule	L'ADN est une molécule complexe formée par l'imbrication de plusieurs constituants.	
			Des traits représentant la structure extérieure de l'échelle	La structure extérieure de la molécule d'ADN est composée d'une succession de Sucres et de Phosphates.	

			Des traits représentants les nucléotides comme les barreaux d'une échelle ou sur l'hélice	Les deux brins extérieurs de l'ADN sont reliés par les nucléotides.	

Tableau 5 : cK¢ appliqué au niveau ADN

Dans ce tableau nous pouvons remarquer, l'existence de plusieurs objets biologiques qui paraissent identiques : ADN, molécule d'ADN, hélice d'ADN. Ils désignent tous le même objet (ADN), mais le nom présent devant (molécule ou hélice) en fait des objets biologiques différents pour notre modélisation, car ils apportent des informations supplémentaires, notamment sur la structure.

Les tableaux pour les autres niveaux sont placés dans l' Annexe V.

L'élaboration de cette formalisation avec le modèle cK¢, nous a permis de construire notre situation. Ainsi, le matériel biologique disponible dans les protocoles pré-structurés correspond à l'ensemble des objets biologiques présents pour un même niveau. De plus, les verbes d'actions prédéfinies que les élèves ont la possibilité de choisir, ont tous été appliqués, dans cette modélisation, à l'ensemble des objets biologiques. L'association verbe d'action et objet biologique correspond aux opérateurs de la modélisation. Enfin, cette modélisation nous a permis d'élaborer nos grilles d'analyse quantitative ainsi qu'un outil de diagnostic de conceptions comme nous le verrons dans la partie IX de ce chapitre.

Maintenant que nous avons défini et analysé la situation et le problème posé en fonction du savoir scolaire et de notre cadre théorique, nous pouvons réaliser une analyse préalable à l'expérimentation afin d'envisager les résultats que nous pourrons obtenir.

V. Analyse préalable

Cette analyse préalable a pour but d'anticiper les résultats issus de l'analyse des productions des élèves ayant réalisés la situation. Ces résultats sont à la fois quantitatifs et qualitatif. Ils concernent le niveau biologique le plus présent dans les productions, l'objet biologique, le verbe d'action, mais aussi les conceptions que nous pensons retrouver dans les productions. Ces prédictions tiennent compte des différentes analyses que nous avons effectuées : historique, scolaire, *a priori* …

Ainsi, certains niveaux biologiques seront plus présents que d'autres. À notre avis, ce sont les niveaux Chromosome, Gène et ADN qui regrouperont le plus grand nombre de productions d'élèves et pourront conduire aux conceptions des élèves. Nous pensons à ces niveaux car ce sont les derniers étudiés en classe et que les connaissances récemment enseignées sont souvent celles qui ressortent lorsque les élèves produisent.

Nous pensons également que les niveaux Organe, Organisme et Milieu et donc les conceptions qui sont rattachés à ces niveaux, seront très peu présents car ce sont des niveaux éloignés de l'information génétique et qui, au cours de l'enseignement, sont très peu mis en relation avec cette information. Nous prédisons aussi que les conceptions au niveau Caryotype seront rares, mais cette fois-ci ce n'est pas pour une raison de distance avec l'information génétique. Ce serait plus dû au fait que penser au caryotype mènera les élèves vers le niveau Chromosome qui sont les constituants du caryotype. Ce niveau pourra correspondre à un début de réflexion mais n'apparaîtra pas dans les productions finales des élèves.

Nous pouvons également faire des prédictions concernant les verbes d'actions possibles sur l'information génétique. Ainsi, parmi les quatre verbes d'actions possibles (« ajouter, enlever, échanger et dupliquer »), nous pensons que le verbe d'action « dupliquer » apparaitra moins que les autres car dupliquer un objet correspond moins à l'idée d'une modification, d'un changement. Il en va de même pour le verbe d'action « échanger », car un échange fait plus référence, au remplacement par un objet identique, sans conséquence. Et pour les élèves, une modification doit avoir une conséquence (Albaladejo, 1988).

En recoupant les prédictions pour les niveaux et celles pour les verbes d'actions, nous pouvons ainsi déterminer des prédications sur les actions qui, a priori, ressortiront le plus de notre diagnostic. Elles sont au nombre de 10 et nous pouvons les lister comme suit :

1. Modifier l'ADN
2. Modifier le gène
3. Modifier le chromosome
4. Modifier le noyau
5. Modifier la cellule
6. Modifier un ou plusieurs nucléotide(s)
7. Ajouter un nucléotide
8. Enlever un nucléotide
9. Enlever un chromosome du caryotype
10. Ajouter un chromosome du caryotype.

Les cinq premières correspondent à une modification, mais sans préciser sa nature, sur les objets biologiques définissant les plus petits niveaux. À notre avis, ils vont apparaître parmi les plus présents car ce sont les derniers étudiés (en troisième et en seconde) mais également parce que dans ces programmes l'enseignement est en relation avec l'information génétique.

Le sixième est une modification au niveau ADN mais d'un objet constituant l'ADN. Le choix de cet objet est lié à son enseignement. Il a été vu, pour la première fois, l'année précédente et l'enseignement des mutations génétiques y est également associé. Mais il n'y a pas de précision sur le mode de modification comme dans les propositions 7 et 8, qui font parties des réponses attendues dans notre situation car correctes scientifiquement et enseignées l'année précédente.

Pour les prédictions 9 et 10, il existe un lien avec l'enseignement de troisième et la découverte du caryotype et des maladies génétiques comme la trisomie ou le fait qu'une paire de chromosomes avec un nombre anormal soit un signe de modification de l'information génétique.

L'ensemble de ces actions pourra également être une base pour le diagnostic des conceptions.

Cette analyse préalable est un des éléments que nous utiliserons pour discuter les résultats.

VI. Échantillon

Cette situation a été testée tout d'abord en mai-juin 2009 (étape 2 de notre expérimentation). Le test a été réalisé auprès de 54 élèves qui appartenaient à deux classes différentes dirigées par deux enseignants et dans deux établissements : le lycée du Grésivaudan à Meylan et le lycée Marie Curie à Échirolles. Ces établissements sont des lycées d'enseignement général et les élèves étaient tous en fin de seconde générale. Ils ont reçu le même enseignement car ils sont tous issus de filière générale.

Etant en fin d'année scolaire de leur seconde générale, ils ont tous, théoriquement, abordé les notions d'ADN et des modifications de l'information génétique au cours de l'année, quelques mois plus tôt. Cela nous permet de dire qu'ils sont de niveau équivalent et ont toutes les connaissances nécessaires pour répondre au problème.

Ensuite, l'expérimentation de la situation finale s'est déroulée en novembre 2009. Les élèves étaient au nombre de 95. Ils font partis de 4 classes réparties sur trois lycées différents : le lycée Madame de Staël à Saint Julien en Genevois, le Lycée Édouard Herriot à Voiron et le lycée Louis Armand à Chambéry. Les quatre classes auprès desquelles nous sommes intervenus sont des classes de première : deux classes de S (54 élèves), une classe de ES (36 élèves) et une classe de L (5 élèves). Parmi les élèves de ES, deux élèves ont réalisé ensemble leurs productions, c'est pourquoi nous avons au final 94 ensembles de productions à analyser.

Nous avons choisis d'intervenir en début de classe de première pour être sûr que l'ensemble des élèves impliqués dans l'expérimentation avaient eu un enseignement, suivant le même programme, concernant l'ADN et ses modifications et ce, plusieurs mois avant. La mobilisation de leurs connaissances fait donc appel à des notions vues et apprises un certain temps auparavant.

La répartition des élèves entre les différentes filières est tirée des chiffres de l'INSEE, 2007 (http://81.255.68.41/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATCCF07108). Ainsi, à partir de 100 élèves en seconde générale et technologique qui passent en première générale, 52% vont en première S, 31% en ES et 17% en L. Nous avons voulu récréer, à peu prés, cette répartition à partir des classes avec lesquelles nous avons pu intervenir, même si le nombre d'élèves de L est un peu plus bas. Cela est du au fait que le nombre d'heure de SVT en première L étant très faible, nous avons du faire appel à des volontaires pour réaliser cette expérimentation en dehors de leurs heures de cours, mais peu d'élèves ont été intéressés.

VII. Organisation pédagogique

Pour la réalisation de la situation, les élèves ont été placés individuellement devant les ordinateurs. En fonction des lycées, de leurs emplois du temps et de l'organisation possible, ils ont été séparés en deux demi-groupes. Chacun des demi-groupes est soit passé successivement, soit a été réparti dans deux salles avec un intervenant - chercheur dans chacune. L'autre moitié de classe restait avec l'enseignant de SVT ou avec celui de physique-chimie dans le cadre de TP alternés.

L'organisation prévue de la situation a donc été la suivante :

Temps	Durée	Acteur	Action
0 minutes	5 minutes	Enseignant	Accueil et installation des élèves – présentation des chercheurs
5 minutes	10 minutes	Chercheurs	Présentation de l'intervention (son rôle, son analyse, ce que l'on attend des élèves) – Présentation de la situation – Présentation de COPEX et de son fonctionnement
15 minutes	5 minutes	Elèves	Connexion aux comptes individuels – Lecture et appropriation de la situation
20 minutes	15 minutes	Elèves	Réalisation de la première production (plusieurs hypothèses pour résoudre le problème) - Enregistrement
35 minutes	10 minutes	Elèves	Réalisation de la deuxième production (dessin de l'hypothèse qui leur semble la meilleure) – Enregistrement– Appel du chercheur
45 minutes	5 minutes	Chercheur	Analyse rapide des deux premières productions (selon les critères définis) – Indication de la lettre du protocole à ouvrir – Ré-explication du fonctionnement de l'éditeur de protocole
50 minutes	10 minutes	Elèves	Réalisation de la troisième production (protocole expérimental de l'expérience choisie) - Enregistrement
60 minutes	1 minute	Elèves	Déconnexion du site

Tableau 6 : Organisation pédagogique de la situation finale

Cette organisation est une indication pour les chercheurs, surtout pour ne pas dépasser le temps imparti aux explications. Ensuite, le temps prévu pour chacune des productions est adapté à chaque élève.

Pour mener à bien notre situation et afin que sa réalisation soit optimale, nous avions auparavant testé la situation (deuxième étape préliminaire.) Le temps total était identique, mais les élèves avaient une production de plus à réaliser et ils devaient imprimer chacune de leurs productions pour nous les remettre en fin d'expérimentation.

Temps	Durée	Acteur	Action
0 minutes	5 minutes	Enseignant	Accueil et installation des élèves – présentation des chercheurs
5 minutes	10 minutes	Chercheurs	Présentation de l'intervention (son rôle, son analyse, ce que l'on attend des élèves) – Présentation de la situation – Présentation de COPEX et de son fonctionnement
15 minutes	5 minutes	Elèves	Connexion aux comptes individuels – Lecture et appropriation de la situation
20 minutes	10 minutes	Elèves	Réalisation de la première production (plusieurs hypothèses pour résoudre le problème) – Impression de cette première production
30 minutes	10 minutes	Elèves	Réalisation de la deuxième production (dessin de l'hypothèse qui leur semble la meilleure) – Impression de la deuxième production – Appel du chercheur
40 minutes	5 minutes	Chercheur	Analyse rapide des deux premières productions (selon les critères définis) – Indication de la lettre du protocole à ouvrir – Ré-explication du fonctionnement de l'éditeur de protocole
45 minutes	10 minutes	Elèves	Réalisation de la troisième production (protocole expérimental de l'expérience choisie) - Impression
55 minutes	5 minutes	Elèves	Réalisation de la quatrième et dernière production (conséquence de cette expérience) - Impression
60 minutes	1 minute	Elèves	Déconnexion du site

Tableau 7 : *Organisation pédagogique de la deuxième étape de l'expérimentation : la situation test*

La quatrième production était la description des conséquences de la modification de l'information génétique. Mais très peu d'élèves ont eu le temps de la faire ou la faisait à la place du protocole. Comme nous voulons privilégier la réalisation du protocole et qu'il ne nous a pas été possible d'allonger le temps d'intervention, nous avons supprimé cette quatrième production. Nous avons également supprimé les impressions qui prenaient du temps et étaient sans utilité pour la situation.

VIII. Corpus

Le corpus de données se compose des productions réalisées par les élèves, dans les deux cas (le test et la situation finale).

Sur les 94 élèves de la situation finale, 12 n'ont pas réalisé de protocole par manque de temps et un n'a pas fait le graphique car il n'y arrivait pas, il est directement passé au protocole. Par contre, l'ensemble des élèves a réalisé le texte des idées.

Les productions ont été analysées grâce aux grilles d'analyse construites et présentées ci-dessous.

IX. Traitement des données

1) Construction de la grille d'analyse

Les Cmap issues de l'étude conceptuelle et le tableau cK¢ obtenu à partir de la modélisation du problème sur l'ensemble des niveaux biologiques que nous envisageons, nous ont permis de construire des grilles d'analyse. Nous avons réalisé une grille par niveau.

Sur chacune de ces grilles nous retrouvons la même organisation : trois ensembles qui correspondent chacun à une des productions demandées : texte des idées, graphique, protocole. La partie graphique est divisée en deux : schéma et légende car les informations sont de nature différente.

Pour chaque niveau biologique, les grilles sont organisées de façon identique. Pour la partie texte, rassemblant les différentes idées de résolution du problème, nous avons repris l'ensemble des objets biologiques du niveau ainsi que les verbes d'actions. Chaque item correspond à une colonne du tableau.

	Idées									
Nom	Modifier	Enlever	Ajouter	Dupliquer	Echanger	Gène	Promoteur	Corps du gène	Terminaison	Total

Tableau 8 : Grille d'analyse pour la partie idées du niveau Gène

Chaque item a ensuite été codé en utilisant le code suivant.

Pour chaque code, les deux premières lettres correspondent au niveau biologique.

OG = Organisme

Og = Organe

Ce = Cellule

No = Noyau

Ca = Caryotype

Ch = Chromosome

Ge = Gène

ADN = ADN

La lettre majuscule qui vient ensuite correspond à la partie de la grille et à la production.

I = Idée

S = Schéma

L = Légende

P = Protocole

La minuscule qui fait suite décrit le terme codé.

Si c'est un verbe d'action : a.

Si c'est l'objet biologique sur lequel on va agir, qui varie : o.

Le chiffre qui suit indique s'il y a plusieurs éléments dans chaque catégorie : verbe d'action (a1, a2, a3 …) ou objet biologique(o1, o2, o3 …).

Par exemple, si on a le verbe d'action « Modifier » sur l'objet biologique « membrane cellulaire » au niveau biologique Cellule dans la production Protocole, le code sera : CePa1o3.

Nous obtenons ainsi la concordance suivante entre les noms des items et leurs codes pour la partie Idée du niveau Gène.

Partie	Nom	Code
Idées	Modifier	GeIa1
	Enlever	GeIa2
	Ajouter	GeIa3
	Dupliquer	GeIa4
	Echanger	GeIa5
	Gène	GeIo1
	Promoteur	GeIo2
	Corps du gène	GeIo3
	Terminaison	GeIo4

Tableau 9 : Signification des codes pour la partie Idée au niveau Gène

Pour la partie graphique, les données sont de deux natures : du texte pour la légende et des dessins pour le schéma. Nous avons donc analysé les deux séparément. Pour la partie schéma, chaque colonne correspond à un dessin défini selon le système de représentation graphique. Pour la légende, les colonnes correspondent aux verbes d'action possibles et aux noms des objets biologiques du niveau considéré. Ils sont codés comme pour la partie idée.

Partie	Nom	Code
Schéma	Chromosome en croix	ChSo1
	Chromosome en bâton	ChSo4
Légende	Modifier	ChLa1
	Enlever	ChLa2
	Ajouter	ChLa3
	Dupliquer	ChLa4
	Echanger	ChLa5
	Chromosome	ChLo1
	Bras	ChLo2
	Centromère	ChLo3
	Chromatide	ChLo4

Tableau 10 : Codes pour l'analyse du graphique du niveau 7, Chromosome

Pour l'analyse des protocoles expérimentaux, les items des colonnes sont construits à partir des opérateurs (R) du modèle cK¢ pour le système de représentation (L) texte. Ils comportent tous un verbe d'action et un objet biologique sur lequel agit le verbe. Cette fois-ci, contrairement à la partie idée, nous n'avons pas séparé les deux, mais nous avons pris l'opérateur dans son ensemble car un protocole expérimental est une suite d'actions. Une action est l'expression d'un verbe d'action sur un objet, c'est pourquoi on obtiendra donc toujours les deux paramètres couplés. Ces items ont également été codés en combinant le code du verbe d'action et celui de l'objet. On met toujours le code du verbe avant le code de l'objet.

Partie	Nom	Code
Protocole	Modifier l'organe	OgPa1o1
	Enlever l'organe	OgPa2o1
	Ajouter l'organe	OgPa3o1
	Dupliquer l'organe	OgPa4o1
	Echanger l'organe	OgPa5o1
	Modifier l'enveloppe	OgPa1o2
	Enlever l'enveloppe	OgPa2o2
	Ajouter l'enveloppe	OgPa3o2
	Dupliquer l'enveloppe	OgPa4o2
	Echanger l'enveloppe	OgPa5o2

	Modifier le contenu	OgPa1o3
	Enlever le contenu	OgPa2o3
	Ajouter du contenu	OgPa3o3
	Dupliquer le contenu	OgPa4o3
	Echanger le contenu	OgPa5v3

Tableau 11 : Codes pour l'analyse du protocole au niveau 3, Organe

L'ensemble des grilles de codes pour tous les niveaux biologiques et toutes les productions est présent dans l'Annexe VI.

Une fois ces grilles d'analyse construites, nous avons déterminé une méthode d'utilisation afin qu'elles puissent être utilisées par des personnes différentes, notamment des personnes différentes de celle qui les a construites et extérieure au travail de ce doctorat.

2) Analyse des productions

Pour chaque production, nous utilisons successivement les grilles d'analyse de chacun des niveaux biologiques. Cette utilisation successive et systématique de l'ensemble des grilles nous paraît indispensable afin de prendre en compte la totalité de la réponse de l'élève et ne rien oublier. Lors de l'analyse des productions, nous avons fait deux choix fondamentaux qui vont par la suite conditionner nos résultats. Tout d'abord, nous avons décidé de ne garder qu'un seul niveau biologique par élève. C'est à dire que les élèves vont pouvoir citer plusieurs niveaux dans leurs productions, mais qu'ensuite, avec l'analyse nous déterminerons quel est le niveau auquel ils placent l'information génétique. En ne gardant qu'un seul niveau par élève, nous perdons des informations, principalement sur les liens entre les niveaux et leur organisation mais nous pouvons déterminer, point essentiel de notre étude, à quel niveau les élèves placent l'information génétique.

Afin d'attribuer tel ou tel niveau à l'ensemble des productions d'un élève nous avons développé une méthode qui consiste à choisir le niveau en fonction du verbe de modification énoncé par l'élève. Ainsi, c'est le niveau qui contient le verbe d'action modifiant l'information génétique qui sera attribué à un élève. Un deuxième mode d'attribution intervient ensuite, il s'agit du nombre d'items cités par niveau. En effet, si deux niveaux contiennent un verbe d'action, c'est le niveau contenant le plus d'items qui sera choisi. Cette deuxième détermination est aussi utilisée quand, dans une production, l'élève n'indique pas de modification L'ensemble de cette méthode d'attribution est plus amplement décrite dans le paragraphe suivant.

A. Test des grilles d'analyse dans la deuxième partie de l'expérimentation

Pour tester les grilles d'analyse, nous avons décidé de fonctionner de la même façon pour chacune des parties des grilles, qu'elle corresponde au texte, au graphique ou au protocole. Afin de savoir dans quelle(s) colonne(s) classer les réponses des élèves, nous nous sommes basé sur l'apparition des items dans leurs productions. Dès qu'un des objets biologiques est

cité ou dessiné, il est compté 1, mais s'il réapparaît, il n'est pas compté une fois de plus. Ainsi, qu'un mot apparaisse une ou trois fois, il sera toujours compté 1. En ce qui concerne le verbe d'action, nous regardons à quel sujet il se rapporte pour pouvoir déterminer le niveau biologique auquel il est rattaché, puis nous comptons 1.

Il se peut qu'un verbe d'action apparaisse plusieurs fois. S'il est lié au même objet biologique, il n'est compté qu'une fois. S'il est apparenté à un objet biologique différent, c'est comme s'il s'agissait de verbes différents. Si les deux objets sont du même niveau biologique, il sera noté 1+1 dans la colonne correspondante. Par contre, si un même verbe est lié à des objets différents sur des niveaux différents, alors cela ne posera pas de problème, le verbe sera compté 1 dans chaque niveau biologique.

Prenons pour exemple les productions de l'élève 34 de ce test de la situation :

Modification de l'information génétique

Vos idées pour la résolution du problème (rédigez un texte) :

-nous allons tenter par exemple de modifier la couleur des yeux de la descendance d'une souris albinos.

-nour allons faire éclater le noyeau de la cellule donneuse et ainsi modifier dans la molécule d'ADN le gène qui fait que les yeux de la souris sont rouges.

ensuite, on va faire développer la molécule et l'implanter dans le noyeau d'une cellule embryonnaire qui donnera ensuite une autre souris.

Figure 24 : Partie Idées de l'élève 34 (test)

Ce texte des idées donnera les grilles d'analyse suivantes. Nous avons enlevé les colonnes vides par soucis de place et de clarté de représentation du tableau. Les significations des codes ont été rajoutées pour une meilleure compréhension.

Niveau Organisme :

	Idées
Code de l'item	OGIo1 (Organisme)
Élève 34	1

Niveau Organe :

	Idées
Code de l'item	OgIo1 (Nom d'organe)
Élève 34	1

Niveau Cellule :

	Idées
Code de l'item	CeIo1 (Cellule)
Élève 34	1

Niveau Noyau :

	Idées	
Code de l'item	NoIo1 (Noyau)	NoIa2 (Enlever)
Élève 34	1	1

Niveau Gène :

	Idées	
Code de l'item	GeIo1 (Gène)	GeIa1 (Modifier)
Élève 34	1	1

Niveau ADN :

	Idées		
Code de l'item	ADNIo1 (ADN)	ADNIo6 (Molécule)	ADNIa3 (Ajouter)
Elève 2	1	1	1

Tableau 12 : Grilles d'analyse de la partie Idées de l'élève 34 (test)

Cet élève donne plus d'informations au niveau ADN et y place également une action pour sa partie Idée.

Une fois la partie des idées analysée avec les grilles, nous passons à la partie schéma.

Pour le graphique, nous agissons de la même façon, nous comptons 1 pour chaque item (dessin pour le schéma ou terme pour la légende) présent dans le graphique des élèves.

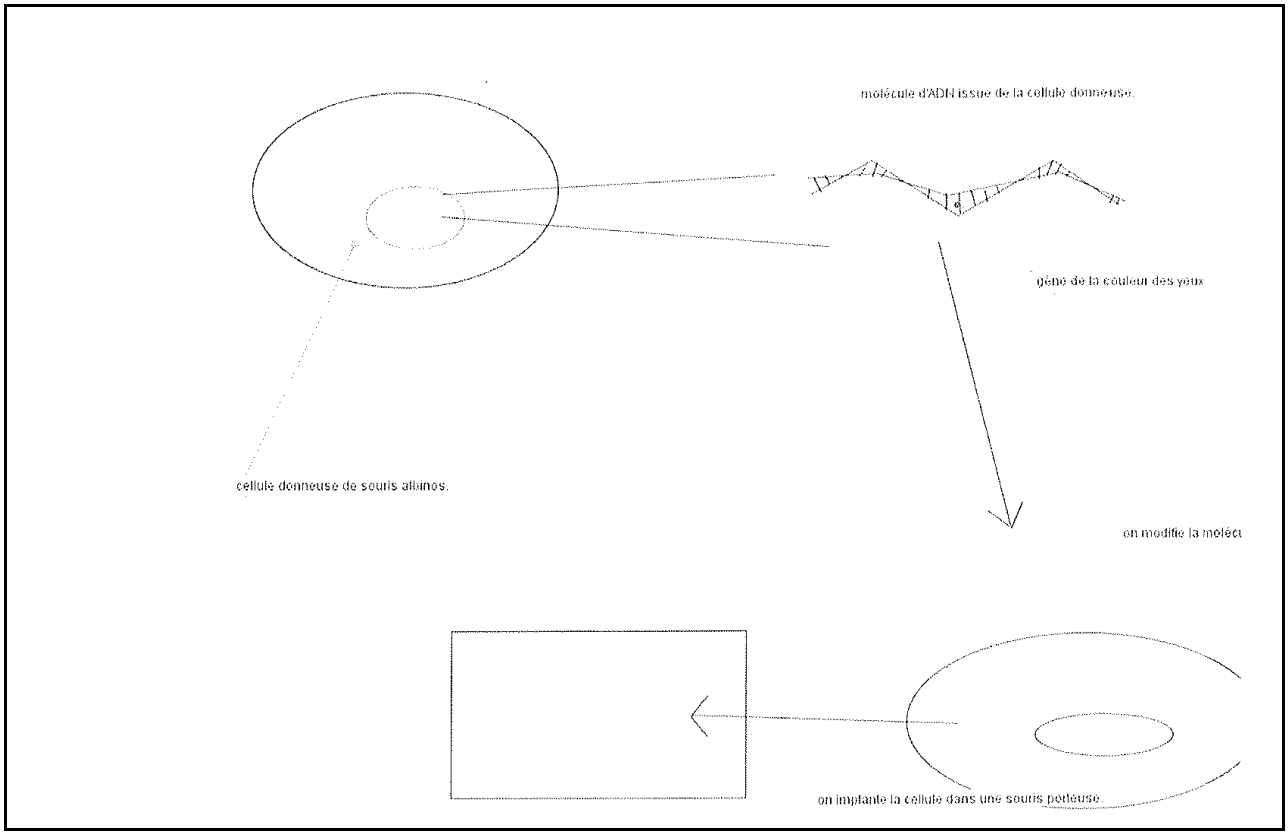


Figure 25 : Partie Graphique de l'élève 34 (test)

Niveau Cellule :

	Schéma
Code de l'item	CeSo1 (Cellule)
Élève 34	1

Niveau Noyau :

	Schéma
Code de l'item	NoSo1 (Noyau)
Élève 34	1

Niveau ADN :

	Schéma	
Code de l'item	ADNSo3 (Barres S-P)	ADNSo7 (Double hélice)
Élève 34	1	1

Niveau Organisme :

	Légende
Code de l'item	OGLo1 (Nom d'organisme)
Élève 34	1

Niveau Cellule :

	Légende	
Code de l'item	CeLo1 (Cellule)	CeLa3 (Ajouter)
Élève 34	1	1

Niveau Gène :

	Légende
Code de l'item	GeLo1 (Gène)
Élève 34	1

<u>Niveau ADN :</u>

	Légende		
Code de l'item	ADNLo1 (ADN)	ADNLo6 (Molécule)	ADNLa1 (Modifier)
Élève 34	1	1	1

<u>Tableau 13 : Grilles d'analyse de la partie Graphique de l'élève 34 (test)</u>

La légende et le schéma de cet élève regroupent plus d'informations au niveau 9 (ADN).

Ces deux productions, le texte des idées et le graphique, servent à déterminer la lettre du protocole expérimental vers lequel orienter l'élève pour la troisième production. Afin de vérifier si l'orientation de l'élève vers un niveau de protocole est bon, nous regardons à quel niveau l'élève place le verbe d'action. C'est ce niveau qui détermine celui du protocole. S'il y a deux niveaux qui comportent des verbes d'action, c'est celui qui compte le plus grand nombre d'items apparus qui définit le niveau du protocole. Si le nombre de verbes d'action est identique, c'est l'action de modification en elle-même qui est considérée, les autres actions étant nécessaire à l'approche de l'objet biologique.

L'analyse du protocole expérimental se déroule de façon identique à celle du texte et du graphique. Nous nous attendons, pour cette troisième production, à n'obtenir que des

actions sur un seul niveau, puisque les élèves ont choisi une idée dans leur premier texte. Mais comme les élèves ont la possibilité d'inscrire des actions libres, nous utilisons quand même successivement l'ensemble des grilles d'analyse du protocole expérimental pour chaque protocole d'élève, afin de n'omettre aucune action.

Encore une fois, dès qu'un opérateur (verbe d'action + objet biologique) apparaît au moins une fois dans le protocole de l'élève, il est compté 1.

Dans le cas de l'exemple suivant (Figure 26) l'élève a été orienté vers un protocole ADN (N9). Mais cela ressort très peu dans son protocole puisqu'il a décidé de remplir son protocole avec des « actions libres » dans lesquelles il peut écrire ce qu'il veut.

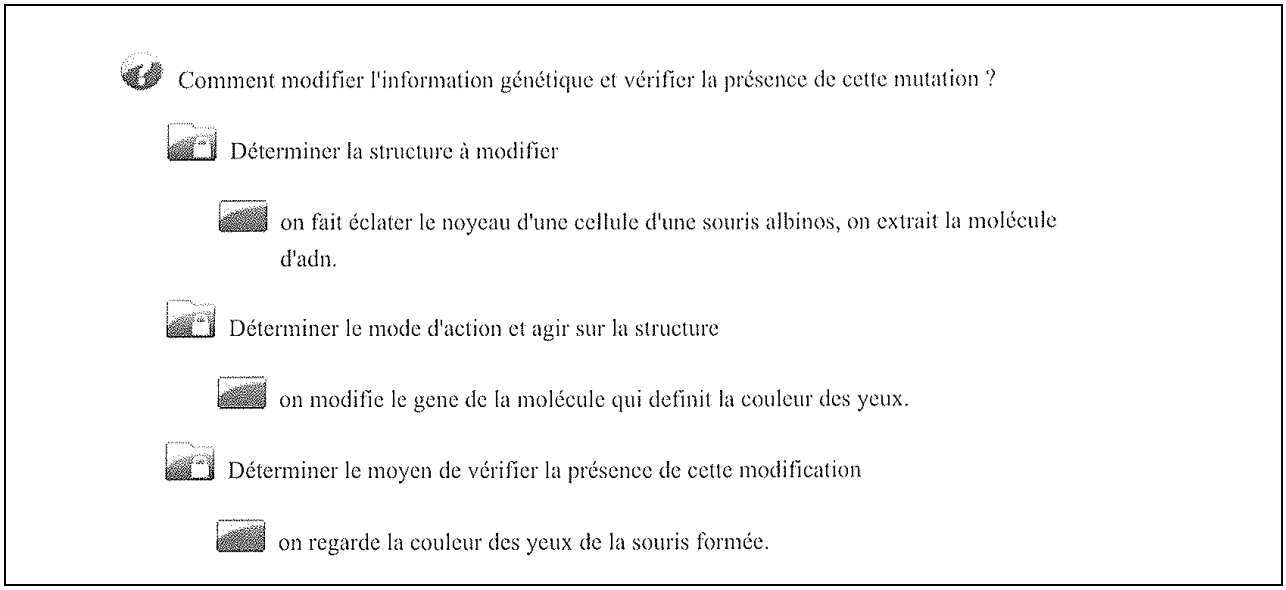


Figure 26 : Partie Protocole de l'élève 34 (test)

Niveau Noyau :

	Protocole
Code de l'item	NoPa2o1 (Enlever le noyau)
Élève 34	1

Niveau Gène :

	Protocole
Code de l'item	GePa1o1 (Modifier le gène)
Élève 34	1

Niveau ADN :

	Protocole
Code de l'item	ADNPa2o6 (Enlever la molécule)
Élève 34	1

Tableau 14 : Grilles d'analyse de la partie Protocole de l'élève 34 (test)

Pour le protocole, on ne remarque aucun niveau préférentiel. Trois niveaux ont été cités (Noyau, Gène et ADN), ils comportent chacun une action (une verbe d'action sur un objet biologique). C'est donc en faisant le total de l'ensemble des productions que l'on pourra

déterminer le niveau biologique auquel cet élève place la modification de l'information génétique.

Bien sur, l'ensemble de ces items ne sont pas tout le temps retrouvés dans les productions des élèves tels que nous les avons définis dans nos grilles de codes. Nous avons donc élaboré une liste de synonymes que nous acceptons pour chaque item (Annexe V).

B. Conclusion de ce test des grilles d'analyse

Ce test des grilles d'analyse nous permet, en faisant le total des points de chaque niveau de découvrir le niveau biologique auquel se place l'élève pour modifier l'information génétique.

Par exemple, pour l'élève 34 cela donne :

Production	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
Texte		1	1	1	2			2	3
Schéma				1	1				2
Légende		1		2				1	3
Protocole					1			1	1
Total		2	1	4	4			4	9

Tableau 15 : Récapitulatif de l'analyse des productions de l'élève 34

Nous pouvons ainsi déterminer que cet élève se place au niveau ADN pour modifier l'information génétique.

Ces résultats nous permettent donc de déterminer à quel niveau biologique les élèves placent l'information génétique et veulent la modifier. Mais cela ne nous suffit pas pour déterminer les conceptions des élèves et exploiter de façon plus complète leurs productions : l'objet biologique support de l'information génétique, l'action principale que les élèves mettent en œuvre pour la modifier… Il est alors nécessaire, pour l'expérimentation, d'adapter notre grille d'analyse afin de dégager des informations complémentaires.

C. Adaptation de l'utilisation des grilles d'analyse pour la partie finale de l'expérimentation

Afin d'obtenir les résultat manquants, c'est l'attribution des points donnés à chaque réponse que nous avons changé. En effet, dans le test, chaque notion était notée 1. Désormais, ce ne sera pas le cas. Nous avons décidé de différencier les points donnés aux objets biologiques et ceux donnés aux verbes d'action. Cela permet de faire un total cohérent et reconnaissable lors de l'association des deux. Ainsi les objets biologiques sont comptés en centaines et les verbes d'action en dizaine. Cela nous permet d'obtenir par exemple, pour le niveau Noyau.

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	NoIa1	10
	Enlever	NoIa2	20

	Ajouter	NoIa3	30
	Dupliquer	NoIa4	40
	Echanger	NoIa5	50
	Prendre	NoIa6	60
	Noyau	NoIo1	100
	Enveloppe	NoIo2	200
	Nucléoplasme	NoIo3	300
	Nucléole	NoIo4	400
Schéma	Un cercle	NoSo1	100
	Deux cercles	NoSo5	500
Légende	Modifier	NoLa1	10
	Enlever	NoLa2	20
	Ajouter	NoLa3	30
	Dupliquer	NoLa4	40
	Echanger	NoLa5	50
	Prendre	NoLa6	60
	Noyau	NoLo1	100
	Enveloppe	NoLo2	200
	Nucléoplasme	NoLo3	300
	Nucléole	NoLo4	400
Protocole	Modifier le noyau	NoPa1o1	110
	Enlever le noyau	NoPa2o1	120
	Ajouter un noyau	NoPa3o1	130
	Dupliquer le noyau	NoPa4o1	140
	Echanger le noyau	NoPa5o1	150
	Prendre le noyau	NoPa6o1	160
	Modifier l'enveloppe	NoPa1o2	210
	Enlever l'enveloppe	NoPa2o2	220
	Ajouter une enveloppe	NoPa3o2	230
	Dupliquer l'enveloppe	NoPa5o2	240
	Echanger l'enveloppe	NoPa4o2	250
	Prendre l'enveloppe	NoPa6o2	260

	Modifier le nucléoplasme	NoPa1o3	310
	Enlever le nucléoplasme	NoPa2o3	320
	Ajouter du nucléoplasme	NoPa3o3	330
	Dupliquer le nucléoplasme	NoPa4o3	340
	Echanger le nucléoplasme	NoPa5o3	350
	Prendre le nucléoplasme	NoPa6o3	360
	Prendre le nucléole	NoPa6o4	460
	Modifier le nucléole	NoPa1o4	410
	Enlever le nucléole	NoPa2o4	420
	Ajouter un nucléole	NoPa3o4	430
	Dupliquer le nucléole	NoPa4o4	440
	Echanger le nucléole	NoPa5o4	450

Tableau 16 : Code des items pour le niveau Noyau

Pour les opérateurs, qui comprennent une action complète (verbe d'action + objet biologique), on inscrit le total des deux.

Nous pouvons constater ce que l'on obtient dans l'exemple suivant pour chaque production.

Modification de l'information génétique

Vos idées pour la résolution du problème (rédigez un texte) :

- échanger le noyau d'une cellule mère de kangourou roux avec celui d'une cellule-mère de kangourou albinos

Figure 27 : Partie Idée de l'élève 15

À partir de ce texte des idées, nous pouvons dégager plusieurs codes :

Niveau Organisme :

	Idées
Code de l'item	OGIo1 (Nom d'un organisme)
Élève 15	100

Niveau Cellule :

	Idées
Code de l'item	CeIo1 (Cellule)
Élève 15	100

Niveau Noyau :

	Idées	
Code de l'item	NoIo1 (Noyau)	NoIa5 (Echanger)
Élève 15	100	50

Tableau 17 : Grilles d'analyse de la partie Idées de l'élève 15

Pour cet élève, le plus grand nombre d'informations et le verbe d'action se trouvent au niveau 5, le niveau Noyau. C'est donc ce niveau qui est considéré et pris en compte pour ensuite déterminer le niveau du protocole à ouvrir.

Une fois le texte des idées analysé, nous pouvons analyser le graphique.

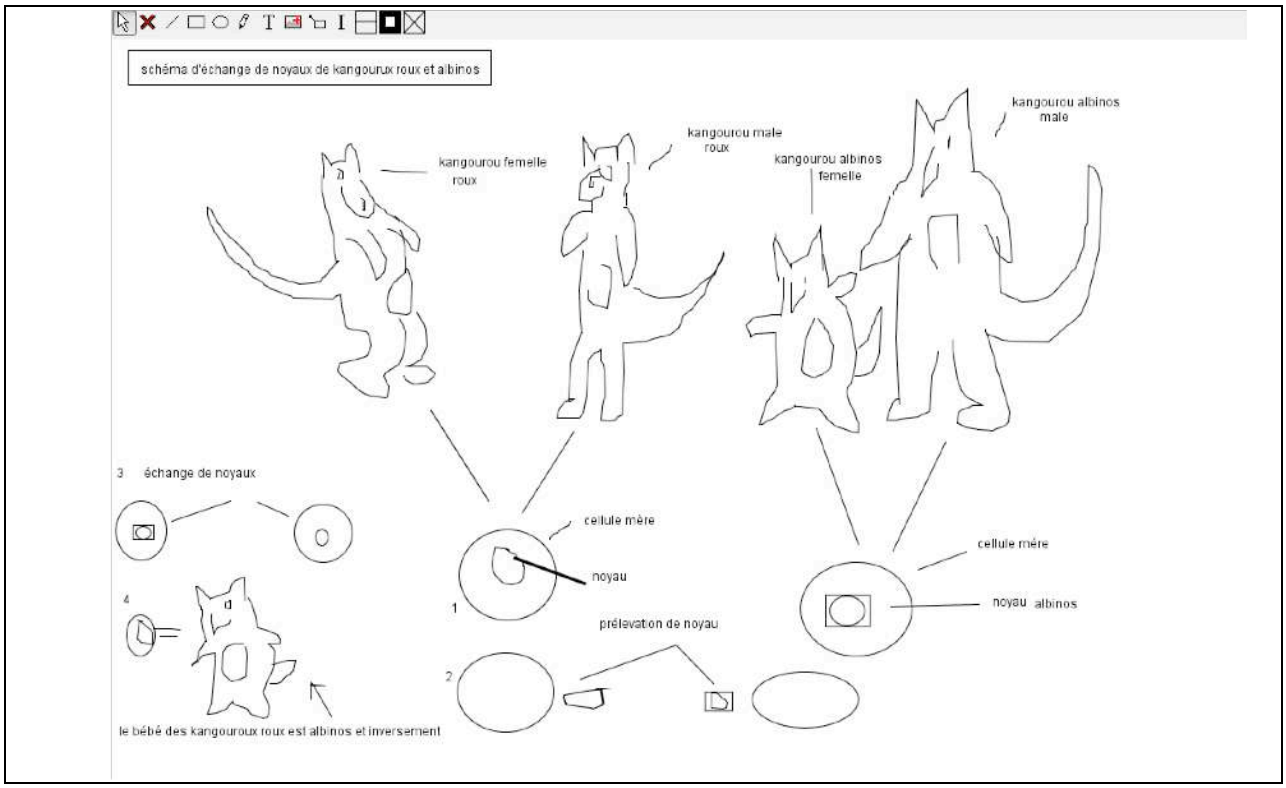


Figure 28 : Graphique de l'élève 15

Ce graphique porte de nombreuses informations et nous pouvons les coder ainsi :

Niveau Organisme :

	Schéma
Code de l'item	OGSo12 (Animal)
Élève 15	200

Niveau Cellule :

	Schéma
Code de l'item	CeSo1 (Cercle pour cellule)
Élève 15	100

Niveau Noyau :

	Schéma
Code de l'item	NoSo1 (Cercle pour noyau)
Élève 15	100

Niveau Organisme :

	Légende
Code de l'item	OGLo12 (Nom d'animal)
Élève 15	200

Niveau Cellule :

	Légende
Code de l'item	CeLo1 (Cellule)
Élève 15	100

Niveau Noyau :

	Légende	
Code de l'item	NoLo1 (Noyau)	NoLa5 (Échanger)
Élève 15	100	50

Tableau 18 : Grilles d'analyse de la partie Graphique de l'élève 15

Comme pour la partie Idée, c'est le niveau Noyau qui est pris en compte pour cet élève. Le chercheur va donc indiquer à cet élève d'ouvrir le protocole D qui correspond au niveau Noyau.

Comment modifier l'information génétique ?

Choisir le matériel à modifier

Elever deux couples de kangouroux, l'un roux et l'autre albinos et faire en sorte qu'ils se reproduisent.

Prélever la cellule-mère 1 de la mère kangourou rousse et la cellule -mère 2 de la mère kangourou albinos.

Modifier le matériel

prélever le noyau 1 de la cellule-mère 1 et le noyau 2 de la cellule mère 2.

Insérer le noyau 1 dans la cellule mère 2 et la cellule 2 dans la cellule mère 1

Replacer les cellules mères ainsi modifiées dans les kangouroux mères desquelles elles ont été extraites auparavant.

résultat

Attendre quelques mois.
Si la mère kangourou rousse donne un kangourou albinos, et inversement l'éxpérience aura réussi.

Figure 29 : Protocole de l'élève 15

Niveau Cellule :

	Protocole	
Code de l'item	CePa2o1 (Enlever cellule)	CePa3o1 (Ajouter cellule)
Élève 15	120	130

Niveau Noyau :

	Protocole
Code de l'item	NoPa5o1 (Échanger noyau)
Élève 15	150

Tableau 19 : Grilles d'analyse de la partie Protocole de l'élève 15

Dans le cas de cet élève, si l'on ne considérait que le nombre d'informations présentes par niveaux, c'est le niveau Cellule qui serait pris en compte. Mais c'est le niveau Noyau qui est considéré car la modification de l'information génétique a lieu à ce niveau, les actions au niveau Cellule ne servent qu'à atteindre le niveau Noyau.

D. Rôle des tableaux croisés dynamiques

Afin de tirer des résultats exploitables de ces grilles d'analyse, nous avons rassemblé l'ensemble des données obtenues dans un seul fichier et nous les avons exprimé dans un tableau de la façon suivante.

Si l'élève n°1 de la classe du lycée de Saint Julien en Genevois indique dans la partie idée : « échanger des chromosomes » cela donne :

Lycée	Classe	Filière	Production	Genre	Élève	Niveau biologique	Objet biologique	Verbe d'action
Saint Julien	1	S	1-Texte	F	1	N7	1	50

Tableau 20 : Récapitulatif de l'analyse d'une action d'un élève

Nous avons ainsi rassemblé sur la même ligne, pour l'ensemble des productions, le verbe d'action et l'objet concerné. Pour l'objet biologique, nous avons raccourci le code et enlevé la marque des dizaines et des centaines, pour le transformer en unité. De plus, si dans une production il y a un objet biologique sans verbe d'action qui s'y rapporte, la colonne 'Verbe d'action' comporte le code 00.

Nous avons procédé de même pour l'ensemble des analyses effectuées. Nous obtenons donc un tableau où les colonnes ont été définies à partir d'une analyse statistique de notre situation. Ainsi, les colonnes correspondent à des variables statistiques. Nous retrouvons ainsi, parmi ces variables, les données obtenues lors de l'analyse des productions des élèves : le niveau biologique, l'objet biologique et le verbe d'action.

En utilisant l'outil Excel, « Tableau croisé dynamique », nous avons pu sélectionner telle ou telle variable et pour obtenir des corrélations entre elles nous avons croisé les données de ces colonnes. Nous avons ainsi cherché à vérifier nos hypothèses issues de l'analyse *a priori* et présente dans la partie analyse préalable de ce chapitre.

Ainsi en croisant les données des variables « filière » et « niveau », nous avons cherché à vérifier si la variable « filière » n'a aucune influence sur le niveau biologique auquel agissent les élèves puisqu'ils ont tous suivi le même enseignement. Ce croisement nous permet aussi d'obtenir le niveau biologique le plus cité pour l'ensemble des élèves.

Le second croisement de variables que nous avons choisi de réaliser est celui des colonnes « niveau biologique » et « verbe d'action » pour vérifier si le verbe d'action le plus utilisé est identique sur l'ensemble des niveaux. Avec ce croisement, nous cherchons aussi à vérifier si ce sont bien les verbes « ajouter » et « enlever » qui sont les plus utilisés par les élèves selon notre hypothèse.

Un troisième croisement concerne les variables « niveau biologique » et « objet biologique ». La vérification à l'origine de ce croisement est celle de l'objet biologique le plus cité pour chacun des niveaux. Nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit à chaque fois de l'objet biologique 1, celui qui donne son nom au niveau.

Le dernier croisement que nous avons effectué est celui des variables « élèves » et « niveau biologique ». Nous cherchons ainsi à établir que, pour l'ensemble des élèves, ce sont bien les niveaux les plus bas qui sont les plus cités (Chromosomes, Gène et ADN).

Nous avons décidé, lors l'utilisation de ce tableau croisé dynamique, de ne pas prendre en compte les variables « Lycées, Classe, Genre et Production ». La variable « Lycée » aurait pu nous donner des renseignements sur une éventuelle différence d'enseignement. Mais cette différence serait, à notre avis, due à l'enseignement reçu et il aurait fallu remonter aux enseignements des années précédentes suivis par chaque élève, pour pouvoir analyser et interpréter de telles données. Nous n'avons pas ces renseignements.

La variable « Classes » est également mise de coté car les classes correspondent aux filières.

La variable « Genre » n'est elle non plus par prise en compte, car nous n'avons pas cherché à connaître les différences de conceptions entre les garçons et les filles, ce n'est pas l'objectif de notre recherche.

La dernière variable que nous n'avons pas prise en compte avec cette méthode est celle des productions. Nous avons cherché à considérer les productions dans leur ensemble et, dans les résultats, lorsque que des liens avec les productions apparaissent, ce n'est pas la technique des tableaux croisés dynamiques qui est employée pour obtenir ces résultats.

Cette technique des tableaux croisés dynamiques nous a tout de même permis d'obtenir la plus grande partie de nos résultats quantitatifs.

E. Détermination des conceptions

La deuxième partie de nos résultats est plus qualitative et concerne les conceptions. Afin de découvrir quelles conceptions apparaissent dans les productions et peuvent être attribuées aux élèves, nous avons procédé en deux étapes.

Grâce à l'utilisation du modèle cK¢ pour modéliser les connaissances biologiques de notre problème, nous pouvons développer un outil de diagnostic des conceptions à partir des productions des élèves. Cet outil se base sur le modèle cK¢ et sa formalisation et permet de déterminer qu'une conception peut être attribuée à un élève si :

- Il exprime une ou deux action(s) formée(s) d'un des verbes d'action que nous avons choisi (Modifier – Enlever – Ajouter – Dupliquer – Echanger) et d'un objet biologique (ceux qui apparaissent dans les cartes conceptuelles).
- Il exprime, ou si le chercheur peut reconstruire à partir de ces productions, une connaissance en rapport avec cette action. Cette connaissance peut être :
    - Une caractéristique de l'objet : sa structure, sa fonction, sa localisation…
    - Une caractéristique du verbe d'action : précision sur son rôle, son mode d'action…
    - Une caractéristique du niveau biologique auquel appartient l'objet biologique : son organisation, ses spécificités…
    - Une conséquence de l'action

Ces actions et connaissances peuvent être représentées dans les productions des élèves sous forme langagière (texte des idées, protocole) ou graphique (schéma + légende).

Grâce à cet outil, nous avons analysé les productions de l'ensemble des élèves et repéré les conceptions qui apparaissaient. Nous déterminons qu'une conception est présente si au

moins deux élèves la développe dans leurs productions, nous aurons alors une cohérence inter-élèves. Les actions et connaissances qu'ils expriment ne sont pas forcément identiques mais renvoie à la même idée. Une conception peut donc être constituée de plusieurs actions et de plusieurs connaissances, mais qui correspondent au développement de la même idée de modification de l'information génétique.

Le fait d'avoir déterminé qu'une conception peut être attribuée à un élève seulement s'il exprime trois éléments de cette conception est très important. En effet, si nous avions choisi de ne prendre en compte que deux éléments, beaucoup plus d'élèves auraient été concernés mais cela ne reflèterait pas forcément une conception. Car un élève qui donne un opérateur et un contrôle correspondant à une conception peut les donner sans avoir cette conception. Ces éléments peuvent juste être en rapport avec la conception qu'ils ont, notamment les éléments de connaissances sont parfois communs à plusieurs conceptions. De façon opposée, si l'on s'intéressait à quatre éléments de chaque conception (deux actions et deux connaissances), cela serait trop important car nous n'avons pas demandé aux élèves de justifier leurs choix. Ce sont surtout les connaissances qui manqueraient dans ce cas.

Avec trois éléments, nous obtenons un nombre représentatif d'élèves par conceptions, à partir de leurs productions.

Après avoir déterminé quelles sont les conceptions qui rassemblent au moins deux élèves, nous cherchons à savoir à combien d'élèves chacune d'elles peut être attribuée. Pour cela, nous avons construit et utilisé un tableau rassemblant les actions et les connaissances tirées des productions des élèves. Nous l'avons ensuite analysé avec chacune des conceptions dégagées et repéré si les élèves expriment trois éléments ou plus de chacune de ces conceptions.

L'ensemble de ces méthodes d'analyse nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans le chapitre suivant, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs.

Chapitre VI : Résultats de l'expérimentation

I. Résultats

L'analyse des données issues des productions des élèves nous a permis de tirer plusieurs résultats de notre situation. Ce sont à la fois des résultats quantitatifs obtenus par l'utilisation de tableaux croisés dynamiques notamment (le nombre d'élèves citant un niveau, le verbe d'action ou l'objet biologique principal par niveau, …), mais aussi des résultats qualitatifs acquis dans le cadre de l'utilisation du modèle cK¢ pour la formalisation des conceptions.

Nous commencerons la description et l'analyse de ces résultats par les résultats quantitatifs.

1) Analyse quantitative

A. Nombre de productions par élève

Le nombre de productions que chaque élève a effectué est représentatif de la réalisation et de la compréhension de la situation. La majorité des élèves ayant réussi à réaliser l'ensemble des productions demandées, nous pouvons conclure que notre situation a été bien comprise par les élèves et ne leur a pas posé de problème lors de la réalisation des trois productions.

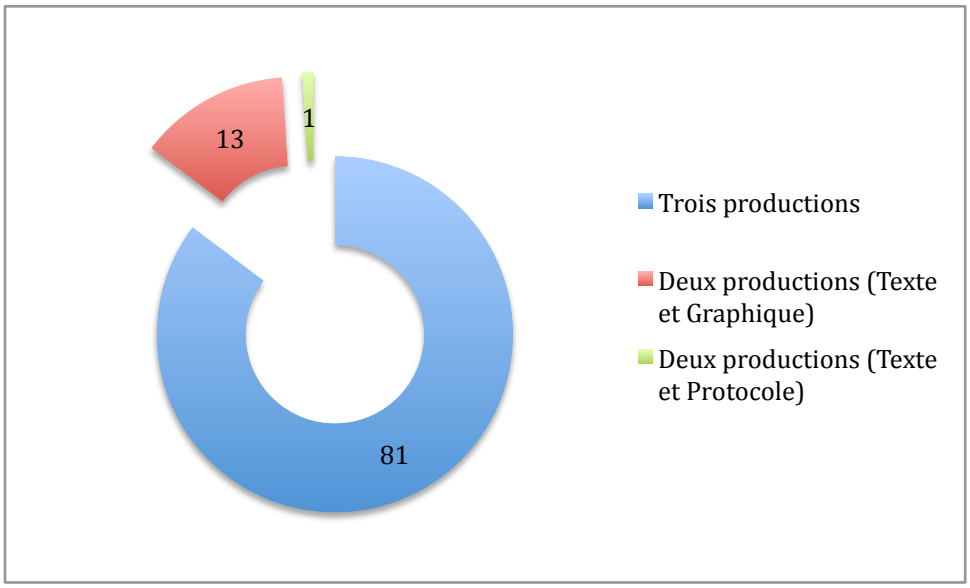


Figure 30 : Nombre de productions par élève

Parmi les élèves qui n'ont réalisé que deux productions, un seul n'a fait que le texte et le protocole. Il n'a pas fait le graphique car il ne voulait pas dessiner. Pour tous les autres, les deux productions sont le texte et le graphique, le protocole n'a pas été réalisé par manque de temps. Ces élèves ne représentent qu'une partie faible de l'effectif total, mais il serait quand même utile d'allonger le temps de la situation afin d'obtenir, de l'ensemble des élèves, toutes les productions demandées.

B. Niveau le plus cité

Nous avons ensuite regardé quel était le niveau le plus cité pour chaque filière. Nous voulions ainsi valider l'hypothèse selon laquelle ce sont les niveaux les plus récemment enseignés, les niveaux les plus bas (Chromosome, Gène et ADN) qui seront les plus présents dans les productions des élèves.

Si l'on s'intéresse également à la variable statistique « filière », c'est que nous pensons qu'elle n'a aucune incidence sur les niveaux cités, les élèves ayant tous suivis le même programme d'enseignement de la génétique.

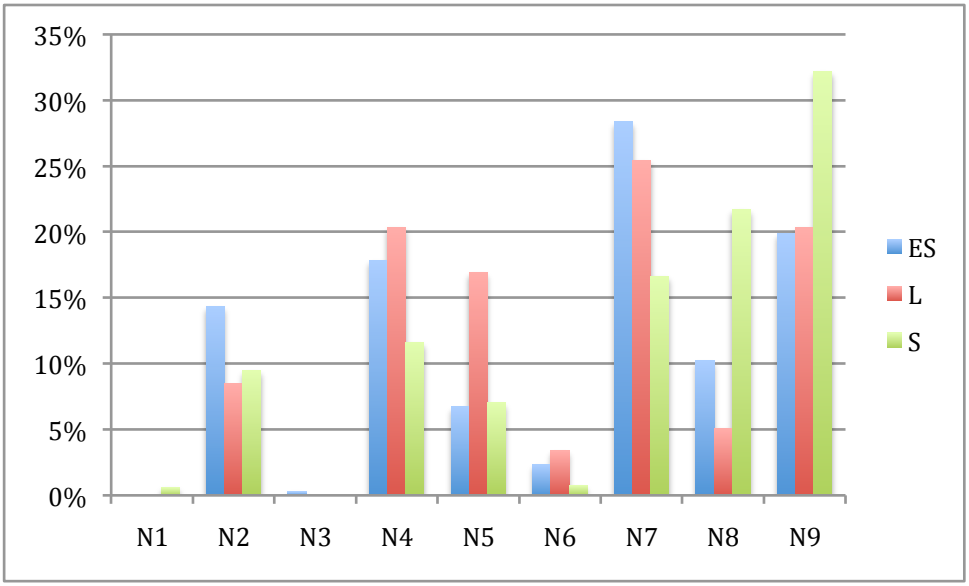


Figure 31 : Citation des niveaux pour chaque filière

Nous constatons, tout d'abord, que les neuf niveaux biologiques sont cités par les élèves.

Mais nous remarquons que pour les élèves de S, c'est le niveau 9 (ADN) qui est le plus cité, c'est donc majoritairement à ce niveau qu'ils placent l'information génétique et la modifie. Par contre, pour les élèves de L et de ES, c'est le niveau 7 (Chromosome) qui est le plus cité. Il semble y avoir un effet filière auquel nous ne nous attendions pas et qui reste à confirmer. Car si les filières sont différentes, ainsi que les motivations pour les SVT et les projets des élèves, les enseignements qu'ils ont reçus ont pu également être différents, les programmes ne servant que de base à l'enseignement.

L'association chromosome - information génétique semble faire sens pour ces élèves de L et ES avec plus de 25% de citations chacun. Les interprétations pour expliquer l'importance numérique de cette association peuvent être multiples.

Cela peut s'expliquer par le fait que le niveau Chromosome est le niveau étudié en classe de troisième. C'est donc le dernier niveau étudié avant les gènes et l'ADN en seconde. Les élèves de ES et de L semblent avoir davantage intégrés les notions du programme de troisième que celles de seconde. La non-maîtrise de ces nouvelles notions fait que les élèves ne les utilisent pas.

Une autre explication possible est le fait que les élèves sont partisans du moindre effort intellectuel et vont citer un niveau qui leur demande moins de réflexion, comme le montre Marbach-Ad (2001) quand il cite Fischer (1983) : « Students are attracted to answers at a level of generality that is most familiar to them, i.e. answers which require the fewest mental steps to verify. » [les élèves sont attirés par un niveau de généralité qui est plus familier pour eux, par exemple la réponse qui nécessite le moins d'étapes mentales à vérifier.]

Une troisième explication possible peut être le manque de motivation de la part des élèves pour les SVT. En effet, même si les élèves sont en seconde générale et suivent les mêmes cours, il y a déjà une pré-orientation, du fait des options choisies, vers les filières de première. Et l'intérêt des élèves pour les SVT, et donc leur attention et leur apprentissage des notions biologiques, y est associé. Ce manque de motivation les oriente alors vers un réinvestissement des connaissances apprises avant la seconde. La relation entre la motivation et la réponse d'un élève a déjà été étudiée et nous pouvons retrouver ce lien dans l'article de Venville et Treagust (1998) : « Hidi (1990) suggested that students' selective attention, effort and willingness to persist at a task, and their activation and acquisition of knowledge are influenced by their personal interest. A correlation has also been shown between students who find a subject interesting, important, and useful to them and the use of deeper processing strategies such as elaboration and metacognitive control strategies (Pintrich, 1989; Pintrich & Garcia, 1991) » [Hidi suggère que l'attention sélective des élèves, leur effort et leur volonté à persister dans une tâche et leur activation et acquisition de connaissances sont influencés par leur intérêt personnel. Une corrélation est aussi montrée entre les élèves qui trouvent un sujet intéressant, important et utile pour eus et l'utilisation de stratégies développées profondément comme l'élaboration et les contrôles métacognitifs de stratégies.] (Venville et Treagust, 1998).

Toutefois, la prédominance du niveau Chromosome pour les filières ES et L peut également être lié à un problème d'abstraction qui fait obstacle, pour eux, à l'apprentissage des niveaux moléculaires (Knippels, Waarlo et Boersma, 2005) : Gène et ADN. En effet, ces deux niveaux, les plus bas, nécessitent la mise en œuvre d'un fort degré d'abstraction pour être imaginés, manipulés et réinvestis.

Toutes filières confondues, nous retrouvons cette répartition importante sur les niveaux 7, 8 et 9 (Chromosome, Gène et ADN) si l'on regarde le nombre total de citations pour chaque niveau. Nous pouvons faire l'hypothèse que ces niveaux sont les plus présents chez les élèves car ce sont les derniers étudiés mais également parce que ce sont les plus présents, lorsque l'on parle de l'information génétique et ce quel que soit le média.

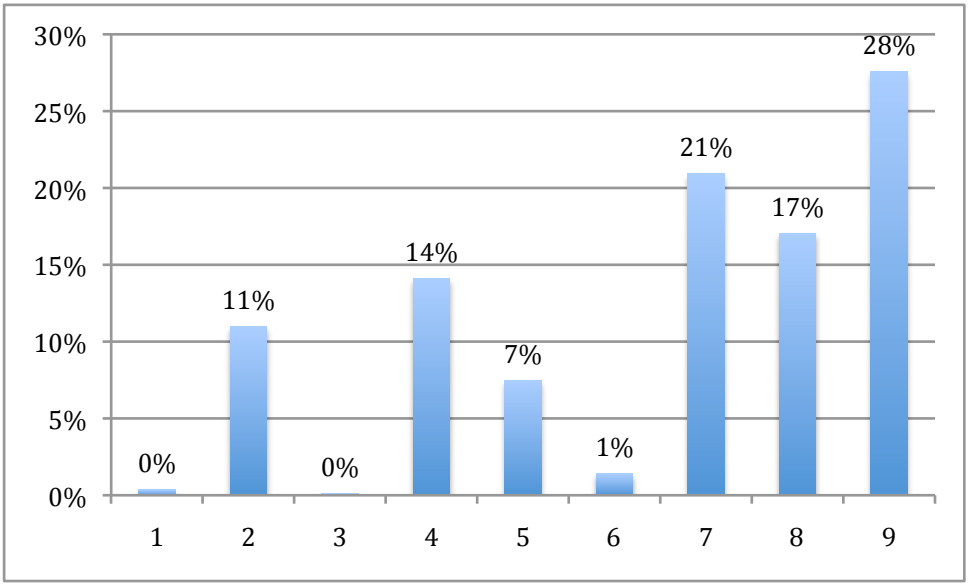


Figure 32 : Niveau le plus cité pour l'ensemble des élèves

C'est le niveau 9 qui apparaît clairement comme le plus cité. On peut également remarquer que trois niveaux sont négligeables dans notre étude : N1, N3 et N6. Il s'agit des niveaux Milieu, Organe et Caryotype qui comptent moins de 1% de réponses et qui concernent respectivement deux élèves (N1), un élève (N3) et 11 élèves (N6), qui citent ce niveau une fois ou deux. Il n'y a que pour le niveau caryotype (N6), qu'un élève y place sa modification de l'information génétique. Nous rappelons qu'un élève peut citer plusieurs niveaux dans ses productions (ce qui est comptabilisé ici), mais que l'ensemble de ces productions ne sera attribué qu'à un seul niveau, celui où il modifie notamment l'information génétique (ce que nous verrons par la suite).

Ces niveaux apparaissent peu, comme nous nous y attendions, car pour le Milieu et l'Organe, ce ne sont pas des niveaux support de l'information génétique donc, ils ne sont pas enseignés comme tel dans les programmes. Pour le niveau Caryotype, même s'il est présent dans les programmes de troisième et en lien avec l'information génétique, les élèves ne font pas appel à lui lorsqu'il s'agit de modifier l'information génétique. Ce sont les Chromosomes qui le constituent qui sont cités.

Pour les autres niveaux, la répartition nous semble logique puisque les niveaux 8 et 9 (Gène et ADN) ont été étudiés l'année précédent notre expérimentation, en classe de seconde. Le niveau 7 des chromosomes fait parti du programme de troisième et comme nous l'expliquions plus haut, c'est le niveau qui prédomine dans les connaissances des élèves qui ne s'orientent pas vers une formation scientifique. Les niveaux 4 et 5 (Cellule et Noyau) sont également enseignés au collège et en relation avec l'information génétique, c'est pourquoi ils apparaissent dans les productions des élèves mais sans être les niveaux biologiques les plus cités. Le niveau 2 de l'organisme est également cité, c'est, à notre avis, parce qu'il est étudié continuellement en lien avec l'information génétique, tout au long de la scolarité.

Nous pouvons constater qu'un peu moins de la moitié des élèves (45%) placent l'information génétique à un niveau moléculaire : Gène ou ADN. L'autre moitié des élèves est aux niveaux supérieurs, 22% se trouvent d'ailleurs aux niveaux cellulaires : Cellule et Noyau. Cette importance des niveaux cellulaires peut être, de nouveau, du au degré d'abstraction à mobiliser pour atteindre les niveaux moléculaires. Ces différences entre les niveaux, dues à des degrés d'abstraction, rejoignent les résultats des études réalisées par Bahar, Johnstone et Hansell en 1999 et Marbach-Ad et Stavy en 2000. Dans leurs différents travaux, ils font apparaître que les élèves ont plus tendance à citer des niveaux biologiques qui demandent moins d'abstraction pour les visualiser et les comprendre.

C. Verbe d'action le plus cité

Lors de la construction de notre situation, nous avons considéré 5 verbes d'action différents : Modifier – Ajouter – Enlever – Dupliquer – Echanger. C'est l'utilisation de ces verbes qui va être analysée maintenant.

Le premier, « modifier », est un verbe généraliste qui correspond au verbe employé dans la question. Nous faisons l'hypothèse que pour certains élèves, il est principalement utilisé quand ils n'ont pas d'idée sur l'action à réaliser pour modifier l'information génétique mais qu'ils indiquent quand même un niveau et un objet biologique (partie suivante).

Quant aux quatre autres verbes, ils donnent réellement un élément de réponse à la question posée. En utilisant un de ces verbes, l'élève explique comment modifier l'objet biologique choisi : l'ajout, la suppression, la duplication ou l'échange d'un objet biologique. Concernant ces quatre verbes, nous avions fait l'hypothèse, lors de l'analyse *a priori,* que les verbes « ajouter » et « enlever» seraient les plus présents dans les productions des élèves car ils correspondent plus à une idée de modification.

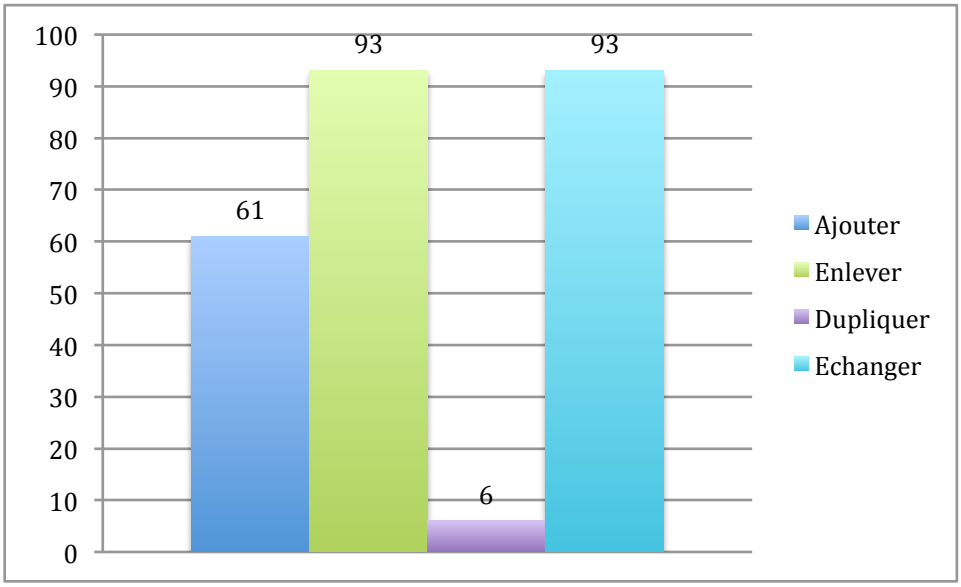


Figure 33 : Utilisation des quatre verbes.

Si l'on regarde l'utilisation de ces quatre verbes, nous pouvons remarquer que notre hypothèse n'est pas validée. Ce sont les verbes « enlever » et « échanger » qui sont les plus employés par les élèves. Ces deux verbes sont ceux qui, pour les élèves, correspondent le plus à une action de modification de l'information génétique. En troisième vient le verbe « ajouter ». Nous constatons également que le verbe « dupliquer » est très peu utilisé, ce que nous envisagions dans notre analyse préalable. La fréquence d'utilisation du verbe « échanger » est identique à celle du verbe « enlever », ce à quoi nous ne nous attendions pas, de par la signification de ce verbe. Et si nous regardons plus attentivement l'utilisation de ces deux verbes, nous pouvons constater que le verbe « échanger » est réellement utilisé pour modifier l'information génétique, alors que « enlever » est utiliser pour accéder à cette information. C'est donc réellement l'échange qui est considéré par les élèves comme une modification de l'information génétique.

L'explication de ce résultat que nous n'envisagions pas, peut être la suivante. L'utilisation prioritaire de ce verbe peut être du au fait que les modifications biologiques dont les élèves entendent le plus parler (articles, médias) font toutes appel à cette notion d'échange : échange de noyaux dans le clonage, échange de gènes dans la thérapie génique pour ne

citer que les plus connus. Ces modifications de l'information génétique faisant intervenir le verbe « échanger » sont également les plus présentes dans les programmes et les manuels que les élèves utilisent. Les élèves sont donc influencés dans leurs réponses par ce qu'ils ont lu, vu ou entendu.

D. Objet biologique le plus cité par niveau

Pour chaque niveau, plusieurs objets biologiques peuvent être modifiés par les élèves. Il est alors important de connaître celui sur lequel ils veulent agir préférentiellement. Lors de l'étude préalable, nous avons fait l'hypothèse que ce serait l'objet principal, celui qui donne son nom au niveau, qui serait préférentiellement cité dans les productions des élèves, et ce pour chaque niveau.

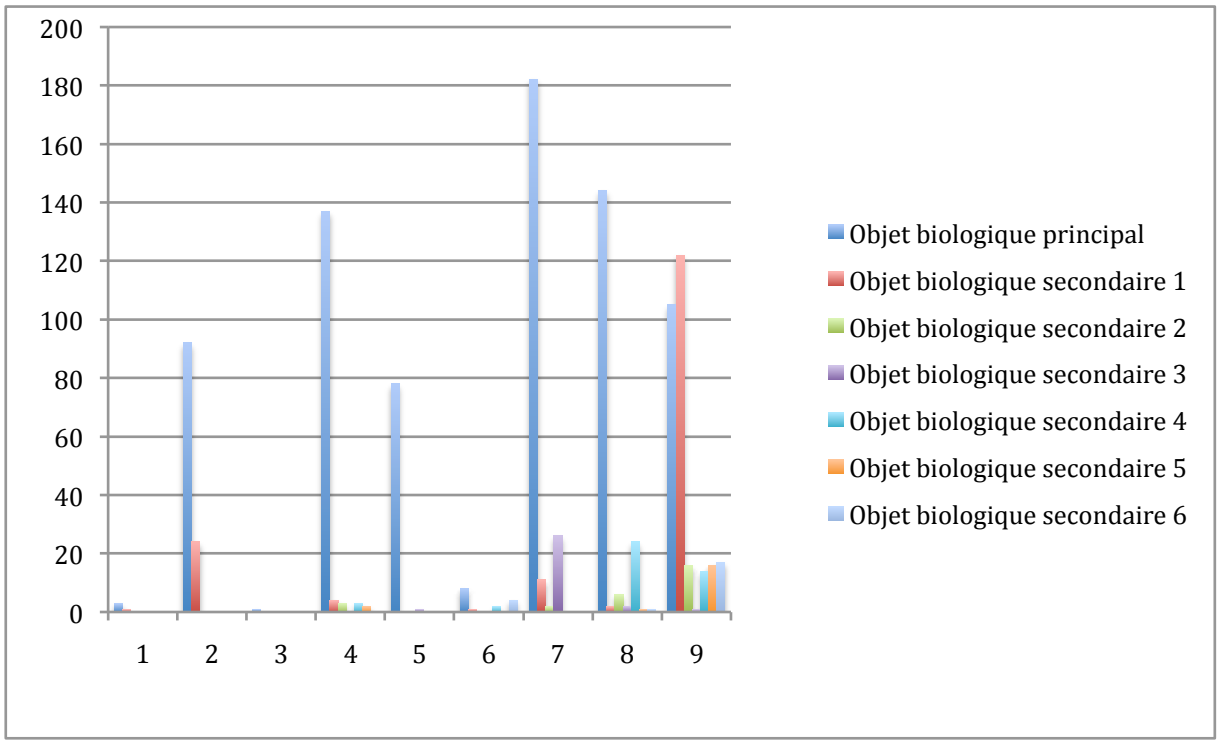


Figure 34 : Utilisation des objets biologiques par niveau

Pour les huit premiers niveaux, c'est bien l'objet biologique principal, c'est-à-dire celui qui donne son nom au niveau, qui le qualifie, qui est le plus modifié. Ainsi, au niveau Cellule, c'est sur la cellule en elle-même que les élèves placent l'information génétique et c'est pourquoi ils veulent agir dessus.

Seul le dernier niveau, le niveau ADN est différent. Dans ce niveau, c'est sur l'objet biologique secondaire que les élèves agissent le plus. Il s'agit des nucléotides, un des constituants de l'ADN. Mais l'ADN suit de près, c'est le deuxième objet biologique sur lequel ils agissent dans ce niveau.

Même si cela ne correspond pas totalement à notre hypothèse, ce résultat ne nous étonne pas car en seconde les modifications de l'information génétique sont étudiées par l'intermédiaire des mutations qui se font au niveau des nucléotides. Nous faisons l'hypothèse que les élèves citant cet objet réinvestissent donc leurs cours de seconde.

E. Ensemble des productions sur un même niveau

Maintenant que nous savons que la grande majorité des élèves a réussi à réaliser l'ensemble des productions et que nous avons dégagé les verbes d'action utilisés et les objets biologiques concernés, nous pouvons étudier si l'ensemble de ces productions sont au même niveau principal. Théoriquement, le graphique et le protocole sont au même niveau puisque le protocole détaille l'expérience représentée graphiquement. Mais en ce qui concerne le texte, ce n'est pas évident, car plusieurs idées y sont développées.

Si l'ensemble des productions de chaque élève est au même niveau (idée principale du texte, du graphique et du protocole), c'est-à-dire le niveau pour lequel l'élève donne le plus de détails et agit, c'est que l'élève dés le début avait une idée de l'expérience qu'il voulait développer par la suite. Si ce n'est pas le cas, nous avons fait l'hypothèse que c'est sûrement dû au fait qu'il avait plusieurs idées pour lesquelles il donnait autant d'informations dans la première production, mais qu'il en a choisit une par la suite pour les deux productions suivantes.

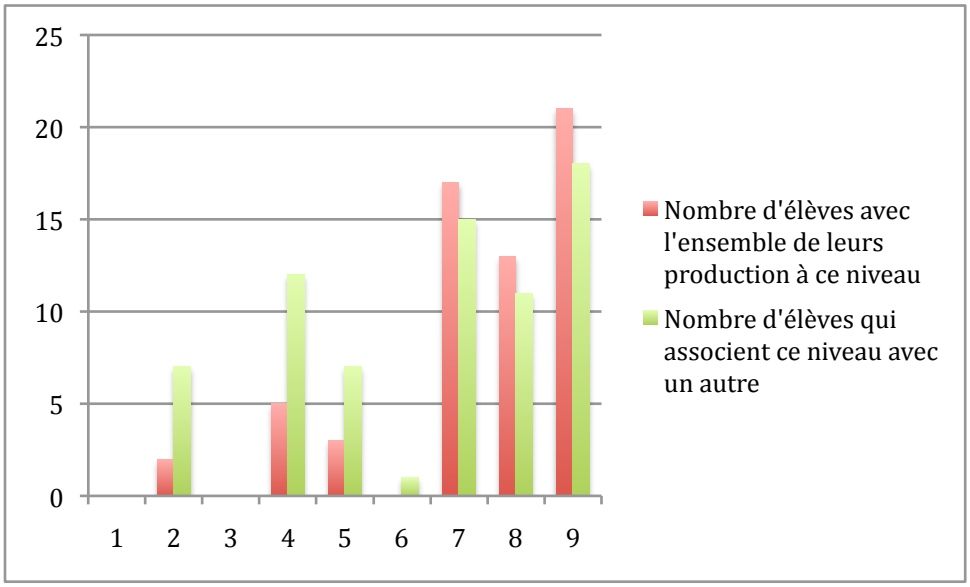


Figure 35 : Ensemble des productions sur un même niveau.

Nous pouvons voir, grâce à ce graphique, que pour certains niveaux les élèves ont plus tendance à les associer avec un autre, qu'à les développer sur l'ensemble de leurs productions. Nous pouvons ainsi constater que les niveaux cellulaires (Cellule et Noyau) et les niveaux Organisme et Caryotype seront préférentiellement associés avec un autre niveau.

Avec cette étude, nous pouvons constater que 2/3 (61/94) des élèves placent leurs trois productions au même niveau principal, si l'on regarde celui pour lequel ils donnent le plus de renseignements dans chaque production.

Pour le 1/3 restant, qui place ses productions à des niveaux principaux différents, nous n'avons pas trouvé de corrélations entre les niveaux principaux cités. Par exemple, si un élève cite le niveau 7, est-ce qu'il citera aussi automatiquement le niveau 8. Ce n'est pas le cas, nous ne pouvons donc rien conclure sur ces élèves là quant aux niveaux principaux développés et corrélés sur l'ensemble de leurs productions.

Le fait que ces résultats montrent que certains élèves ne développent pas le même niveau sur l'ensemble de leurs productions peut être dû à plusieurs raisons. Notamment, cela peut être du à la façon dont nous analysons et comptabilisons leurs réponses. En effet, nous identifions le niveau développé dans chaque production comme étant celui qui est le plus cité. Mais parfois, certains élèves donnent beaucoup de détails dans un niveau mais en modifie un autre. Ce n'est donc pas celui où ils réalisent la modification qui est comptabilisé. C'est une erreur qu'il serait nécessaire de corriger.

F. Choix du niveau développé en fonction du niveau le plus bas dans le texte.

Dans cette partie, nous avons cherché à savoir si le niveau d'échelle le plus bas cité dans le texte est celui développé dans le graphique et le protocole. Théoriquement, les niveaux s'emboîtent les uns dans les autres et si l'on a connaissance du plus bas, on a également connaissance des ceux du dessus et de leurs liens. De plus, si l'on modifie le plus bas, cela pourra avoir des répercussions sur certains niveaux supérieurs. Nous faisons alors l'hypothèse que si l'élève choisit le niveau le plus bas cité dans son texte pour le développer, c'est qu'il a connaissance de toute cette organisation.

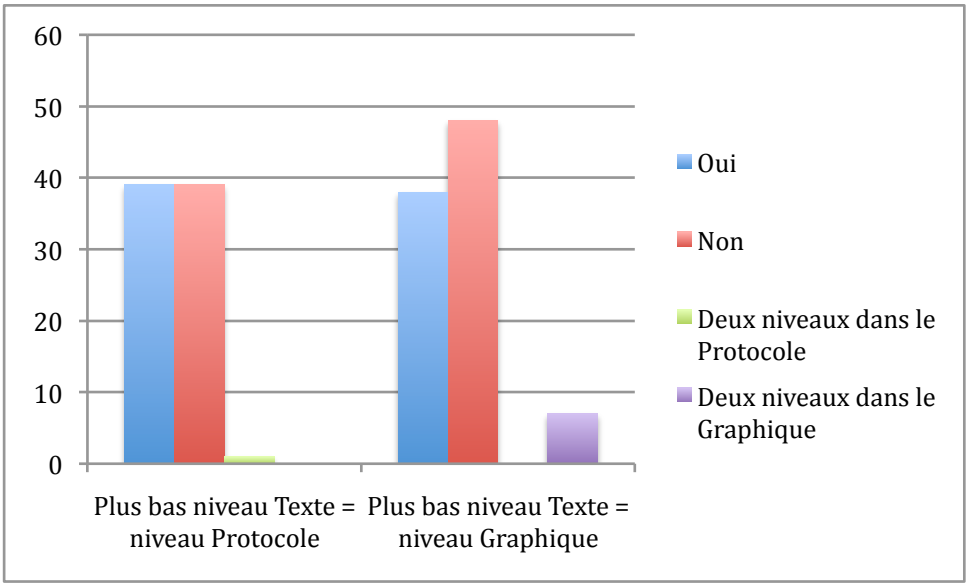


Figure 36 : Cohérence entre le niveau le plus bas du Texte et celui développé dans le Graphique et le Protocole

Grâce à cette dernière analyse quantitative, nous pouvons voir que ce n'est pas toujours le niveau le plus bas cité dans le texte qui est choisi pour être développé dans le graphique et le protocole. Selon notre hypothèse, les élèves qui ne choisissent pas le niveau le plus bas pour le développer, ne maîtrisent pas l'organisation biologique générale. Comme l'expliquent Duncan et Reiser (2007), il existe pour ces élèves un manque de corrélation et de liens entre les différents niveaux d'échelle.

Mais une autre explication possible est le fait que ces élèves, qui ne développent pas le niveau le plus bas cité dans le texte, choisissent le niveau qu'il maitrise le mieux. C'est celui sur lequel ils ont le plus de connaissances qu'ils vont développer dans le graphique et le protocole, sans forcément que ce soit le plus bas énoncé.

2) Analyse qualitative

Après avoir présenté les résultats du point de vue quantitatif, nous présentons une analyse qualitative. Cette analyse qualitative des productions des élèves fait appel au modèle que nous avons utilisé afin de construire notre situation et les grilles d'analyse : le modèle cK¢. Nous avons pu, grâce à ce modèle, construire un outil pour faire émerger des données sur les conceptions des élèves et les formaliser. Cet outil a été explicité dans le chapitre intitulé : *V.IX.2)D : Détermination des conceptions*.

Nous souhaitons, grâce à cet outil, dégager des conceptions à partir des productions des élèves.

A. Conceptions dégagées

En reprenant les actions et connaissances dégagées des productions d'élèves et regroupées dans un tableau et en les analysant avec l'outil que nous avons créé, nous avons pu obtenir neuf conceptions. Ces conceptions sont les suivantes :

1. Échange de cellules,
2. Échange de noyaux,
3. Échange chromosomique,
4. Séparation d'un chromosome,
5. Échange de gènes,
6. Échange de parties d'un gène,
7. Substitution de bases,
8. Échange d'ADN et
9. Échange de l'appariement des bases.

Les noms que l'on a donnés à ces conceptions découlent à la fois du verbe d'action utilisé et de l'objet biologique sur lequel il est utilisé.

Les tableaux suivants décrivent ces conceptions plus en détail et ont été construits à partir de l'analyse des productions d'élèves avec notre outil de diagnostic. Ces tableaux comportent trois colonnes. Dans la première colonne, nous retrouvons les actions composées d'un verbe d'action et d'un objet biologique. Ce sont les actions que peuvent énoncer les élèves dans leurs productions « texte des idées » et « protocole », ainsi que dans la légende du graphique. La deuxième colonne regroupe les connaissances exprimées par les élèves, ou reconstruites par les chercheurs à partir de ce qu'expriment les élèves. Elles correspondent aux caractéristiques des objets biologiques, du niveau considéré ou du verbe d'action, ou aux conséquences des modifications, comme nous l'avions vu dans les cartes conceptuelles réalisées avec le logiciel Cmap. La troisième colonne permet de rassembler les représentations graphiques. Ces représentations graphiques peuvent être des actions ou des connaissances. Ces représentations graphiques sont décrites textuellement dans les tableaux.

Pour chacune des conceptions, nous proposons des exemples d'action, de représentation et/ou de connaissances issus des productions des élèves. Pour les différencier les exemples

tirés des productions d'élèves, des interprétations et conclusions réalisées par les chercheurs, nous avons décidé de mettre ces dernières (les interprétations) en gras.

Conception 1 : Échange de cellules

Échange de cellules		
Action	Connaissances	Représentation graphique
Échanger, transférer une ou plusieurs cellules entre deux individus.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, transférant les cellules de deux individus.	Deux individus avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de cellules.
	La cellule est ronde	Cercle symbolisant une cellule.
	Les cellules co`stitue`t les i`dividus.	Des individus constitués de cellules ou dont on prélève des cellules.
	L'i`formatio` gé`étique est da`s les cellules.	

Tableau 21 : Conception 1 : Échange de cellules

Les élèves à qui l'on peut attribuer cette conception pensent qu'il est possible de modifier l'information génétique d'un être vivant en insérant dans cet individu une ou plusieurs cellules provenant d'un autre individu. Nous pouvons retrouver des éléments de cette conception dans les productions ci-dessous, par exemple.

> « Exemple de transplantation de cellules d'une partie du corps de la femme dans une autre partie du corps de l'homme » (Élève 74)

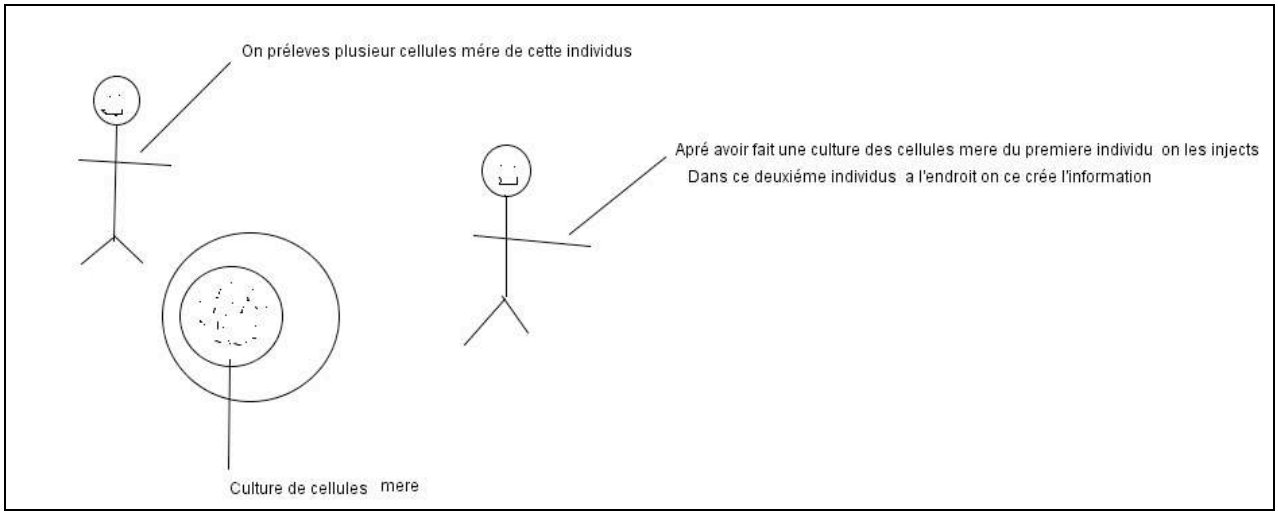


Figure 37 : Exemples d'éléments de la Conception 1 - Échange de cellules (Élève 26)

La mobilisation des éléments de cette conception fait apparaître des problèmes de compréhension liés à l'emboitement des cellules dans les organes et à la notion de cellules différenciées dans les tissus.

Un autre problème peut être soulevé concernant la modification d'une seule cellule pour modifier l'ensemble d'un individu. Nous supposons que c'est du à l'incompréhension de l'expression de l'information génétique au niveau de l'individu.

Conception 2 : Échange de noyaux

Échange de noyaux		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger, remplacer, transférer un noyau entre deux individus.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, remplaçant, transférant les noyaux de deux individus.	Deux individus avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de noyaux.
Échanger, remplacer, transférer le noyau d'une cellule à une autre.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant remplaçant, transférant le noyau d'une cellule à une autre.	Deux cellules avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de noyaux.
	Le noyau est dans la cellule.	Un petit cercle dans un grand cercle symbolisant une cellule et son noyau.
	La cellule est ronde.	Un cercle symbolisant une cellule.
	Les noyaux contiennent l'information génétique.	
	Les `oyaux so`t écha`geables e`tre les cellules.	
	Les `oyaux so`t écha`geables e`tre les i`dividus.	

Tableau 22 : Conception 2 : Échange de noyaux

Les élèves mobilisant cette conception pensent qu'il est possible de modifier l'information génétique en échangeant les noyaux de deux cellules ou de deux individus. Les exemples suivants sont des éléments de cette conception issus de productions d'élèves.

> « D'après moi, l'information génétique se trouve dans le noyau de la cellule d'un individu. Elle contient des informations sur les critères physiques d'un individu. Je pense que pour modifier l'information d'un être vivant il faut transplanter le noyau d'un individu vers un autre. » (Élève 93)

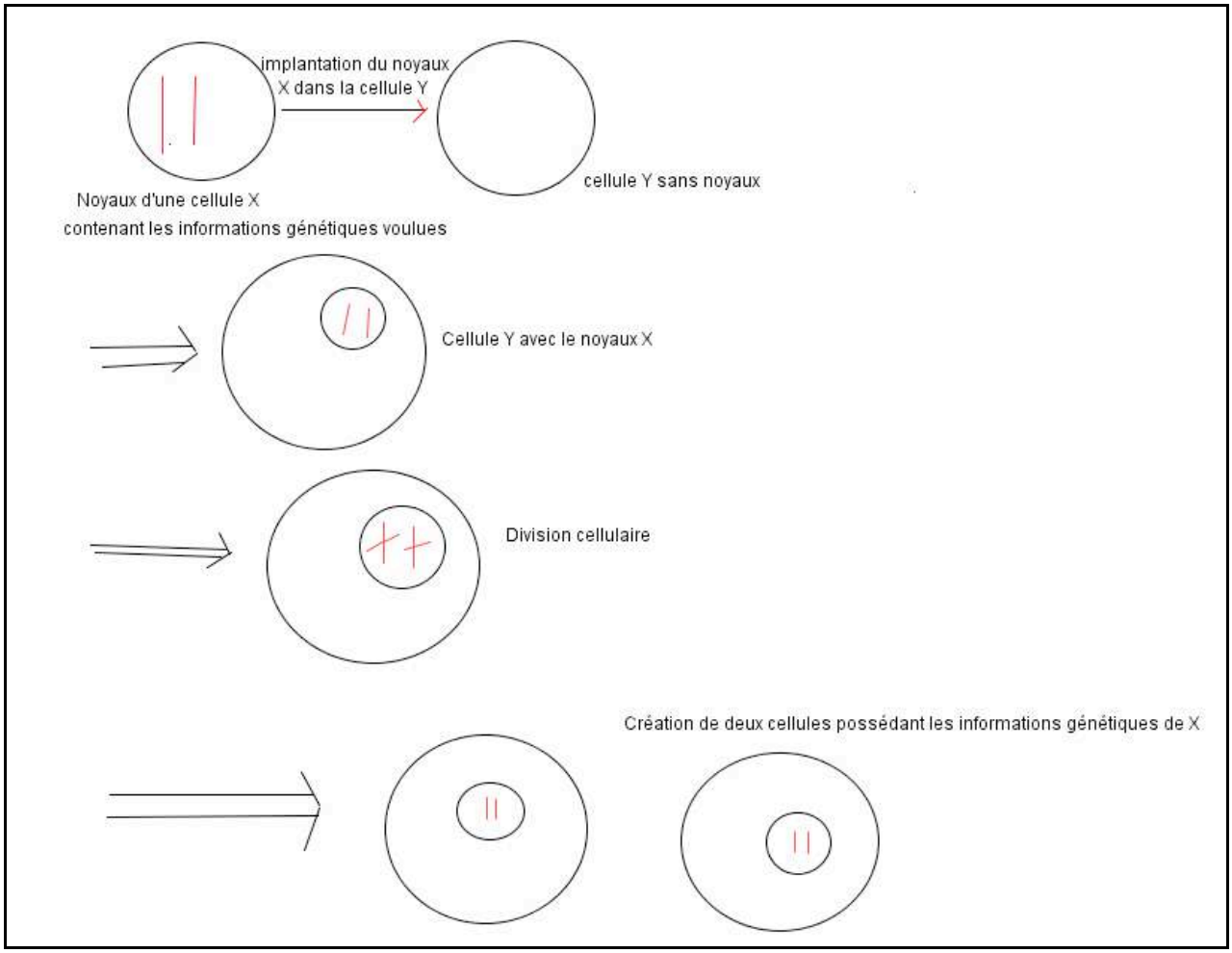


Figure 38 : Exemples d'éléments de la Conception 2 : Échange de noyaux (Élève 61)

Pour certains élèves indiquant un échange de noyaux entre individus (ce qui n'est pas le cas de cet élève), nous pouvons constater une difficulté avec la localisation du noyau dans la cellule. Ce qu'ils expriment laisse penser que les noyaux sont partout dans les êtres vivants et pas localisés dans les cellules (comme pour d'autres élèves).

Conception 3 : Échange chromosomique

Échange chromosomique		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger, remplacer, transférer un ou plusieurs chromosomes entre individus.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant un ou plusieurs chromosomes de deux individus.	Deux individus avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de chromosomes.
		Deux cellules avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de chromosomes.
		Un X symbolisant un chromosome.

		Un bâtonnet symbolisant un chromosome.
	Les chromosomes sont dans le noyau.	
	L'i`formatio` gé`étique se situe da`s les chromosomes.	
	Les chromosomes so`t écha`geables e`tre deux i`dividus.	

Tableau 23 : Conception 3 : Échange chromosomique

Selon cette conception, il est possible de modifier l'information génétique en échangeant un ou plusieurs chromosomes entre deux individus. Des exemples ci-dessous sont présents pour illustrer la présence de ces éléments de conceptions dans les productions des élèves.

> « Pour modifier l'information génétique, on peut faire une transplantation de chromosomes c'est à dire d'inverser les chromosomes d'une personne sur une autre (mais seulement quelques chromosomes). » (Élève 86)

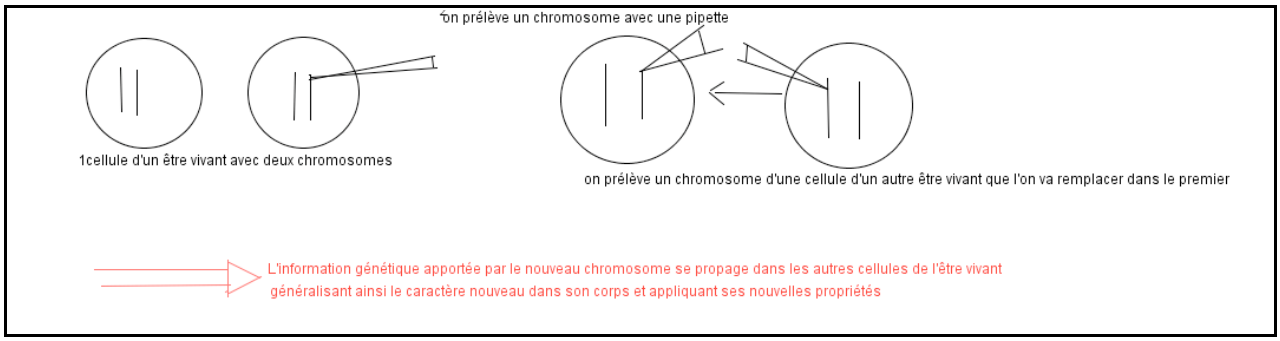


Figure 39 : Exemples de la Conception 3 : Échange chromosomique (Élève 60)

Les élèves qui mobilisent des éléments de cette conception ne prennent pas toujours en compte que les chromosomes se trouvent dans les noyaux des cellules et pas dans le corps des êtres vivants directement. Cette conception est influencée par l'enseignement qu'ils ont suivi en classe de 3ème avec l'étude des caryotypes. Les élèves pensent qu'échanger des chromosomes entre deux personnes va, par exemple, changer les caractéristiques des personnes concernées. Ils veulent agir sur les chromosomes comme s'il s'agissaient de gènes et de morceaux d'ADN de cellules souches. Cela pose un problème de différence entre les gènes et les chromosomes, à propos de leurs rôles et des manipulations qui peuvent les toucher.

Un autre problème est le fait que les élèves agissent sur des animaux adultes (dont l'Homme) mais en ne changeant les chromosomes que d'une seule cellule. Pour eux, le changement sera ensuite transmis à toutes les autres cellules du corps.

Ces problèmes de raisonnement devront être dépassés pour que les élèves acquièrent les bonnes notions.

Conception 4 : Section d'un chromosome

Section d'un chromosome		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Séparer, couper un chromosome.	L'information génétique peut être modifiée en séparant, coupant un chromosome.	Un chromosome coupé en deux, avec une ligne symbolisant la coupure.
Couper une partie d'un chromosome.	L'information génétique peut être modifiée en coupant une partie d'un chromosome.	Un chromosome avec une partie en moins.
		Un X symbolisant un chromosome.
	L'i`formatio` gé`étique se situe da`s les chromosomes.	
	Les chromosomes peuve`t être coupés, séparés.	

Tableau 24 : Conception 4 : Séparation d'un chromosome

Cette conception est attribuée aux élèves qui pensent que l'on peut modifier l'information génétique en enlevant ou coupant un bout de chromosome. Les exemples suivants issus des productions sont la preuve que certains élèves en donne des éléments.

> « On peut couper et recoller des bouts de chromosomes : faire de la chirurgie sur chromosomes » (Élève 90)

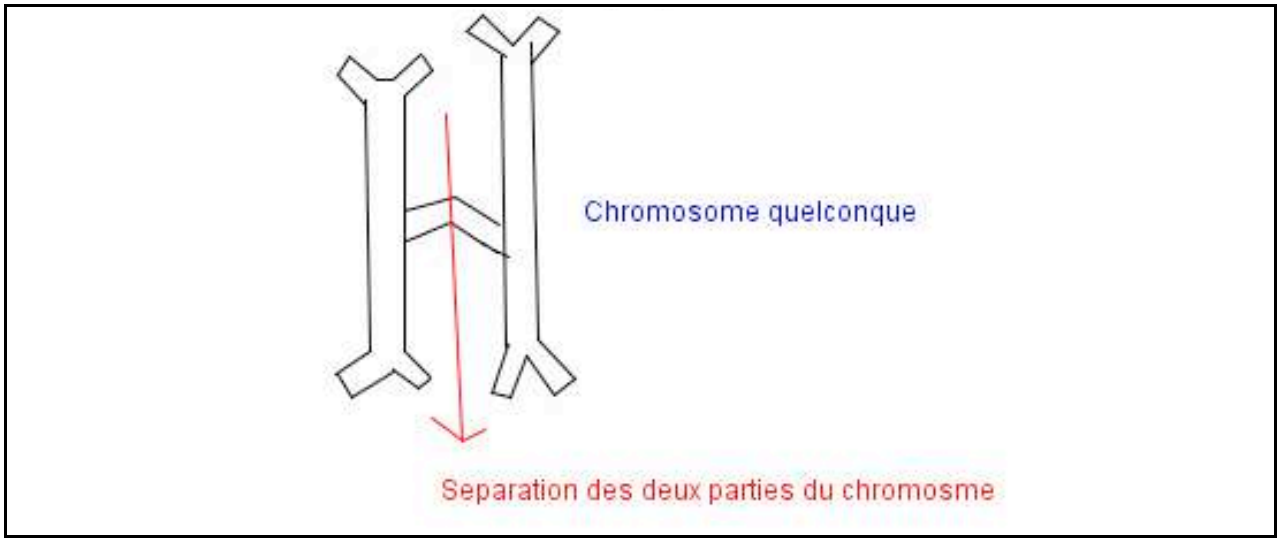


Figure 40 : Exemple d'éléments de la Conception 4 : Section d'un chromosome (Élève 65)

Les élèves qui veulent modifier l'information génétique en coupant un chromosome ne prennent pas en compte la totalité de l'individu et les conséquences d'une telle opération à l'échelle de l'individu. Ils ne regardent que les conséquences au niveau qu'ils considèrent

pour la modification. C'est un problème pour qu'ils puissent acquérir le bon raisonnement concernant la modification de l'information génétique.

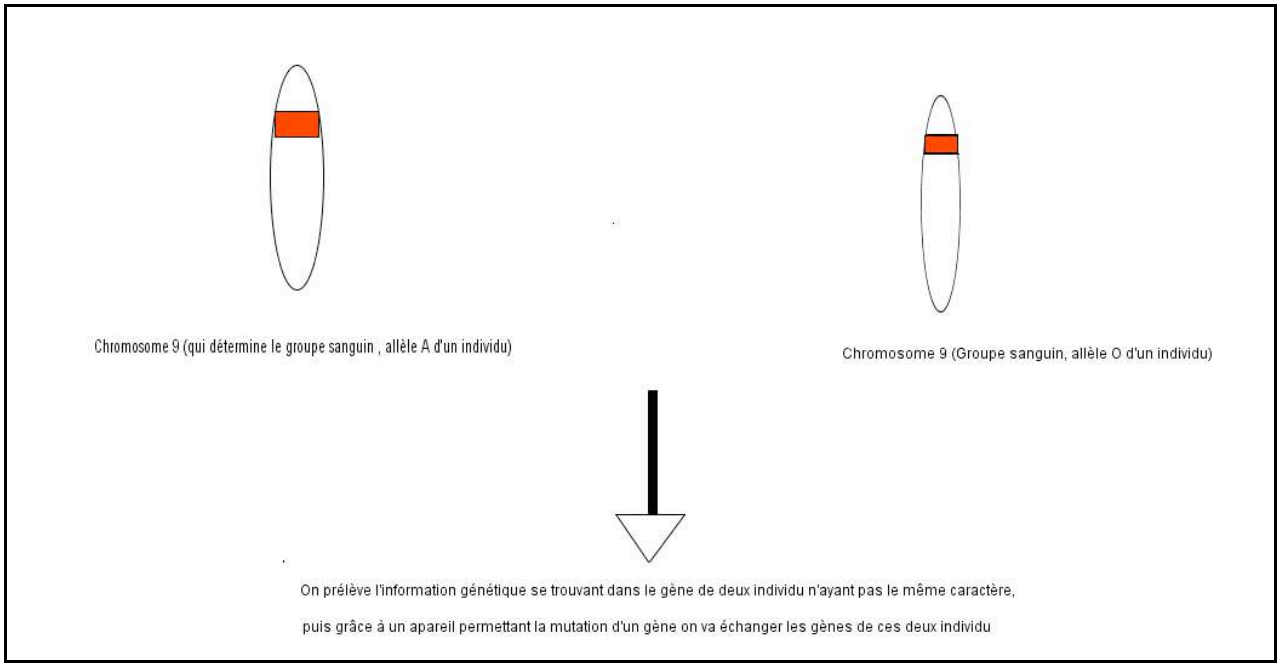
Conception 5 : Échange de gènes

Échange de gènes		
Action	Connaissances	Représentation graphique
Échanger, remplacer un ou plusieurs gènes.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, remplaçant un ou plusieurs gènes.	Deux individus avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de gènes.
		Deux chromosomes avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de gènes.
		Une barre sur un X symbolisant un gène porté par un chromosome.
	Les gènes sont dans les noyaux.	Un chromosome avec une barre dans un cercle avec le mot noyau écrit à côté.
	Les noyaux sont dans les cellules.	Un petit cercle dans un grand cercle.
	Les gè`es so`t des séque`ces de `ucléotides.	
	Les gè`es so`t écha`geables.	
	L'i`formatio` gé`étique est orga`isée sous forme de gè`es.	

Tableau 25 : Conception 5 : Échange de gènes

Selon cette conception, il est possible de modifier l'information génétique en agissant sur les gènes. Cette action est un échange de gènes entre deux individus.

« On peut aussi essayer d'échanger deux gènes. » (Élève 51)



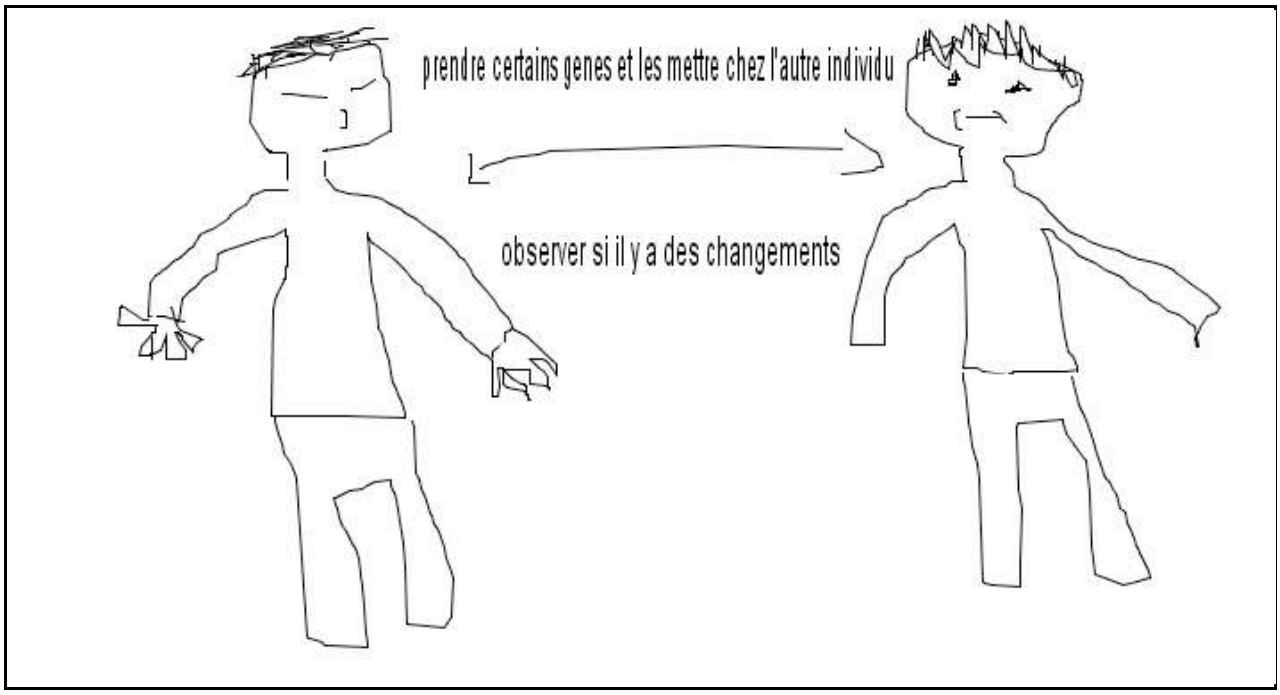


Figure 41 : Exemple d'éléments de la Conception 5 : Échange de gènes (Élèves 51 et 14)

Les élèves à qui l'on peut attribuer cette conception sont influencés par les enseignements qu'ils ont suivi concernant la thérapie génique. En effet, plusieurs élèves indiquent que cette technique va soigner la personne chez qui on remplace un gène malade par le gène sain d'une autre personne. On retrouve également, pour d'autres, le même problème que pour les conceptions précédentes. Les élèves pensent qu'en faisant un seul changement chez un adulte, tout le corps va changer. C'est un problème qu'ils vont avoir à dépasser.

Conception 6 : Échange de parties de gènes

Échange de parties de gène		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger, transférer une ou plusieurs parties de gènes.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, transférant un ou des parties de gènes.	Deux chromosomes avec une flèche entre les deux prescrivant l'échange de parties de gène.
		Une barre sur un X symbolisant un gène porté par un chromosome.
	Les parties de gè`es so`t écha`geables.	
	L'i`formatio` gé`étique est orga`isée sous forme de gè`es.	

Tableau 26 : Conception 6 : Échange de parties de gènes

La modification de l'information peut se faire par échange de parties de gènes entre deux chromosomes. C'est ce que proposent les exemple ci-dessous.

> « On peut peut être implanter une portion de gène, qui contient une information génétique différente, par exemple d'une autre individu. » (Élève 52)

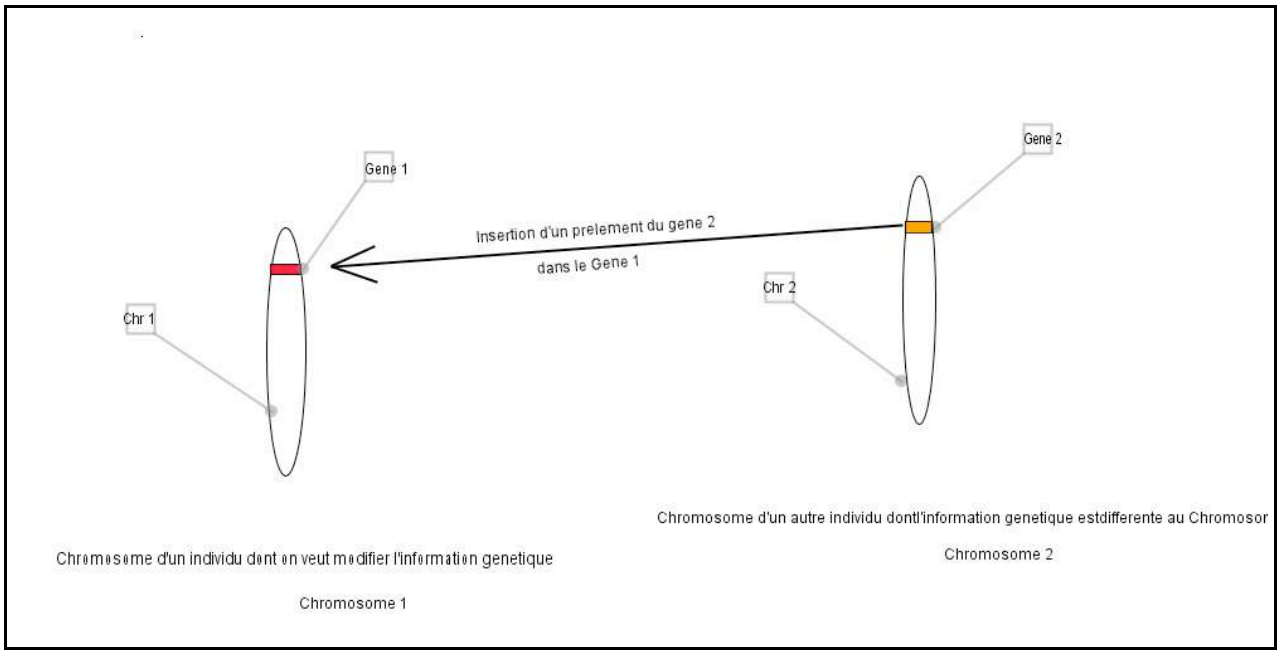


Figure 42 : Exemple d'éléments de la Conception 6 : Échange de parties de gènes (Élève 52)

À partir des éléments de cette conception mobilisés par les élèves, nous pouvons remarquer, de nouveau, qu'ils ne s'intéressent qu'au niveau modifié et qu'ils n'envisagent pas de conséquences au niveau Organisme, même si l'échange se fait entre les gènes de deux individus.

De plus, les élèves considèrent les gènes comme des entités constituées de différentes parties que l'on peut séparer puis réassembler sans difficultés, comme s'il s'agissait de « Légo ». Cette barrière va être indispensable à dépasser pour acquérir un raisonnement biologiquement correct.

Conception 7 : Échange d'ADN

Echange d'ADN		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger, transférer un ADN.	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, transférant l'ADN.	
		Deux cellules avec une flèche entre eux prescrivant l'échange d'ADN.
	L'ADN est une molécule.	
	L'ADN est le support de l'information génétique.	

Tableau 27 : Conception 7 : Échange d'ADN

Il est possible de modifier l'information génétique en échange l'ADN de deux individus. Nous trouvons des exemples des éléments de cette conception ci-dessous.

> « Mettre l'ADN prélevé dans la cellule 1 dans le noyau de la cellule 2. » (Élève 30)

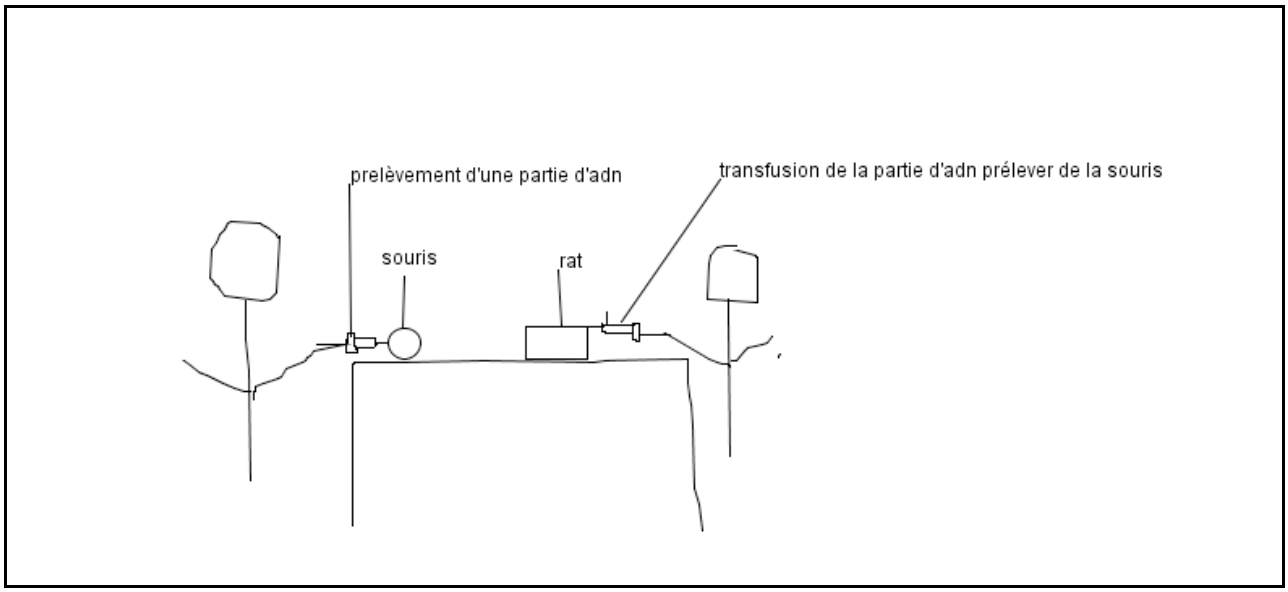


Figure 43 : Exemple d'éléments de la Conception 7 : Échange d'ADN (Élève 62)

Encore une fois, nous pouvons constater que les élèves pensent qu'en changeant l'ADN d'une cellule, l'ADN de toutes les cellules du corps va changer. On retrouve donc un problème de lien entre les niveaux biologiques et d'organisation d'un être vivant, en lien avec son fonctionnement.

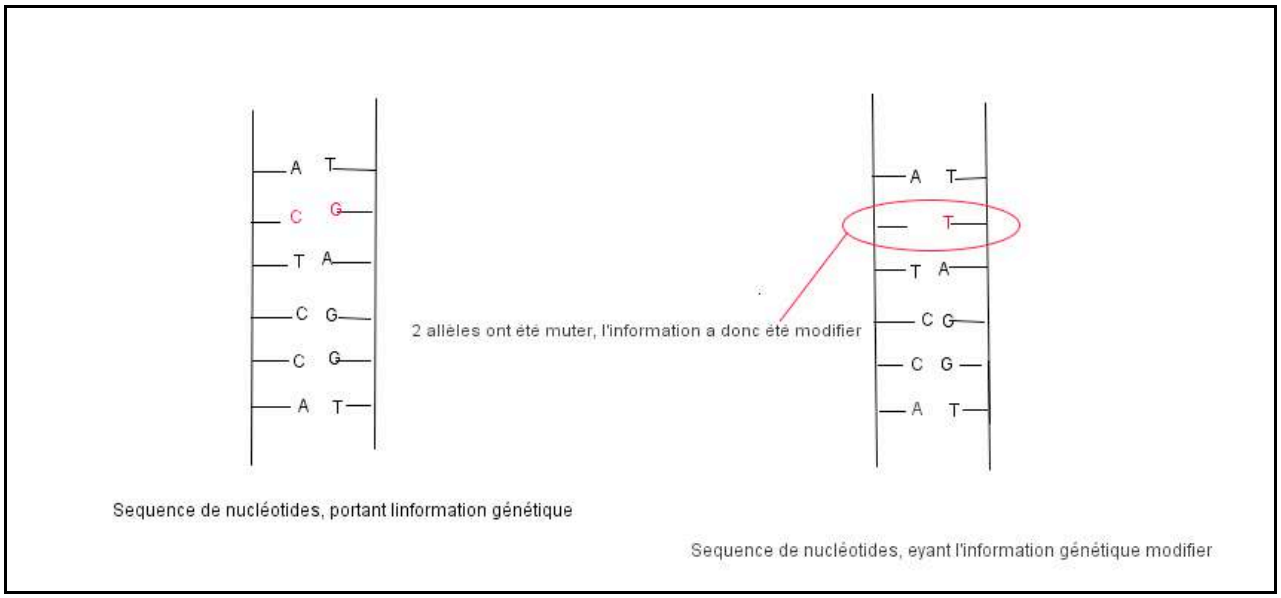
Conception 8 : Substitution de bases

Substitution de bases		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger, substituer, remplacer une ou plusieurs base(s) azotée(s).	L'information génétique peut être modifiée en échangeant, substituant, remplaçant une ou plusieurs bases.	Deux échelles avec des bases représentant l'ADN et ses nucléotides avec une flèche entre les bases prescrivant l'échange de nucléotides.
		Deux échelles avec des barreaux et des nucléotides et une différence dans la succession des nucléotides.
		Deux successions de nucléotides avec une différence dans l'ordre des nucléotides entre les deux.
		Une échelle avec des barreaux représentant l'ADN et ses bases liées.
		Les barreaux représentant les nucléotides.
		Une hélice représentant l'ADN.
	Les nucléotides sont appariés deux à deux (A-T et C-G).	
	L'ADN est le support de l'information génétique.	
	L'ADN est une succession ordonnée de nucléotides (A-T-C-G).	
	Les nucléotides sont échangeables.	
	L'ordre des nucléotides détermine l'information génétique.	

Tableau 28 : Conception 8 : Substitution de bases

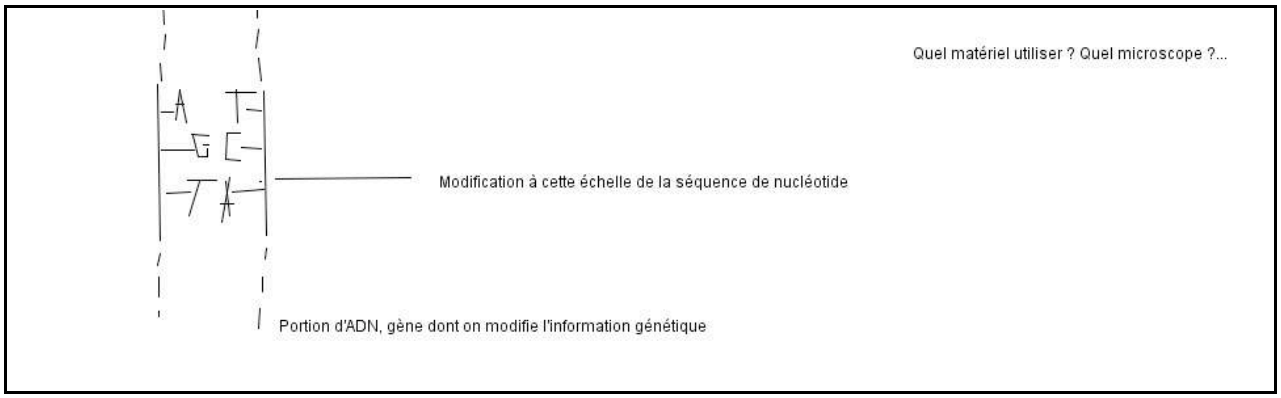
La modification de l'information génétique peut se faire en échangeant ou substituant une ou plusieurs bases de l'ADN. Pour les élèves, les bases s'appellent aussi des nucléotides, le terme nucléosides n'ayant pas été introduit en classe. Plusieurs exemples des éléments de cette conception suivent.

« Modifier les allèles de la molécule d'ADN (argt). » (Élève 12)



(Élève 45)

« L'information génétique ayant comme support les gènes, et plus précisément la séquence de leurs nucléotides, je propose une modification de l'enchainement de nucléotides afin de modifier l'information génétique d'un être vivant. Je travaillerai donc à l'échelle moléculaire (l'ADN est une molécule). Plusieurs moyens de modification de la séquence de nucléotides sont possibles : mutation de certains nucléotides (ajout, suppression, substitution). » (Élève 54)



(Élève 54)

Figure 44 : Exemples d'éléments de la Conception 8 : Substitution de bases

Même si cette conception est celle que nous attendions, il demeure les problèmes, dans les productions des élèves, que ceux issus des conceptions présentées plus haut. A savoir, que la modification d'une séquence de nucléotides dans une cellule ne suffit pas à modifier l'ensemble de l'information génétique d'un individu adulte.

De plus, il manque les conséquences intermédiaires, avant d'arriver à l'expression du phénotype. Mais ce deuxième problème est normal, car c'est un sujet qui est à peine abordé dans les programmes que les élèves ont déjà suivi.

Conception 9 : Appariement des bases

Appariement des bases		
Action	Connaissance	Représentation graphique
Échanger l'appariement des bases, les liaison A-T et C-G, faire A-G et C-T	L'information génétique peut être modifiée en échangeant l'appariement des nucléotides, en changeant les liaisons des bases.	Deux échelles représentant l'ADN avec des bases A-C et G-T appariées.
		L'ADN peut être représenté par une échelle à barreaux.
		Les nucléotides représentent les barreaux.
	Les nucléotides sont appariés deux à deux (A-T et C-G).	A est apparié avec T et C avec G.
	L'ADN est le support de l'information génétique.	
	L'ADN est une succession ordonnée de nucléotides (A-T-C-G).	Une succession ordonnée de nucléotides (A-T-C-G) représentant l'ADN.
	Les nucléotides sont échangeables.	

Tableau 29 : Conception 9 : Appariement des bases

Cette dernière conception montre qu'il est possible, pour les élèves, de modifier l'information génétique en changeant l'appariement des bases de la molécule d'ADN : A-C et G-T.

> « l'information génétique peut être modifiée si il est possible de modifier la molécule d'ADN, peut être en changeant les nucléotides qui s'assemblent, par exemple la nucléotides A qui va avec T, pourra aller avec C et la nucléotide T avec la G. » (Élève 43)

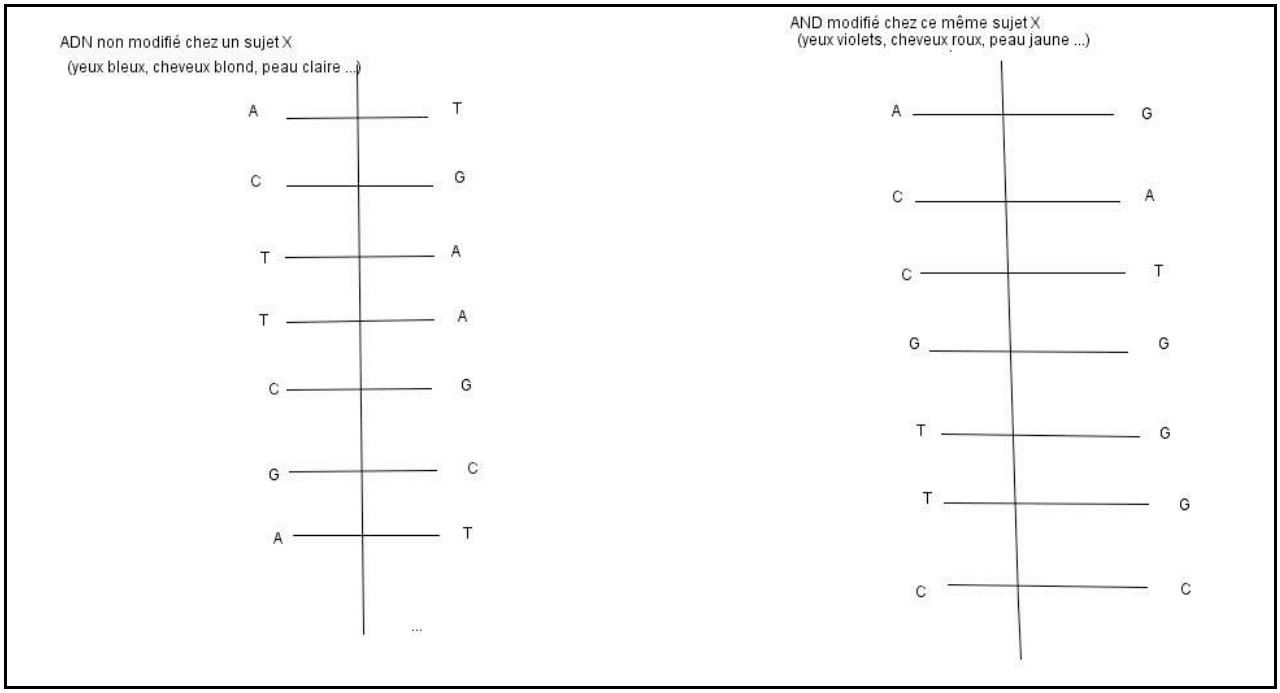


Figure 45: Exemple d'éléments de la Conception 9 : Appariement des bases (Élève 7)

Les élèves indiquant des éléments de cette conception ont bien l'idée qu'il est nécessaire d'agir sur les nucléotides pour modifier l'information génétique. Ils savent aussi qu'il faut faire un échange, mais ne se souviennent pas duquel. L'appariement des bases est le premier qui leur vient à l'esprit, c'est donc celui qu'ils choisissent de modifier. Cela fonctionne car ils ne connaissent pas la structure des différents acides nucléiques, qui impose un nombre de liaisons hydrogènes particulier et conditionne l'appariement.

On retrouve également dans cette conception, les mêmes problèmes de liens entre les niveaux biologiques concernant les conséquences de la modification.

Nous remarquons, en étudiant les connaissances et représentations graphiques, que certaines apparaissent dans plusieurs conceptions. C'est la conséquence de plusieurs faits. Tout d'abord, certains objets biologiques de ces conceptions se rapportent au même niveau, il est donc normal qu'ils aient les mêmes caractéristiques, correspondant à celles du niveau. D'autres par contre, concernent des objets biologiques qui n'appartiennent pas au même niveau. Dans ce cas, c'est dû au fait que les niveaux étant emboîtés les uns dans les autres et liés entre eux, nous retrouvons l'expression de ces liens dans plusieurs des conceptions exprimées ici.

Maintenant que nous avons dégagé ces neuf conceptions des productions des élèves, il est intéressant de connaître le nombre d'élèves ayant chacune de ces conceptions. En effet, nous avons retenu ces conceptions à partir du moment où deux élèves les exprimaient, mais certaines sont tout de même plus présentes que d'autres. Nous cherchons donc à quantifier chacune de ces conceptions dans les productions des élèves, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

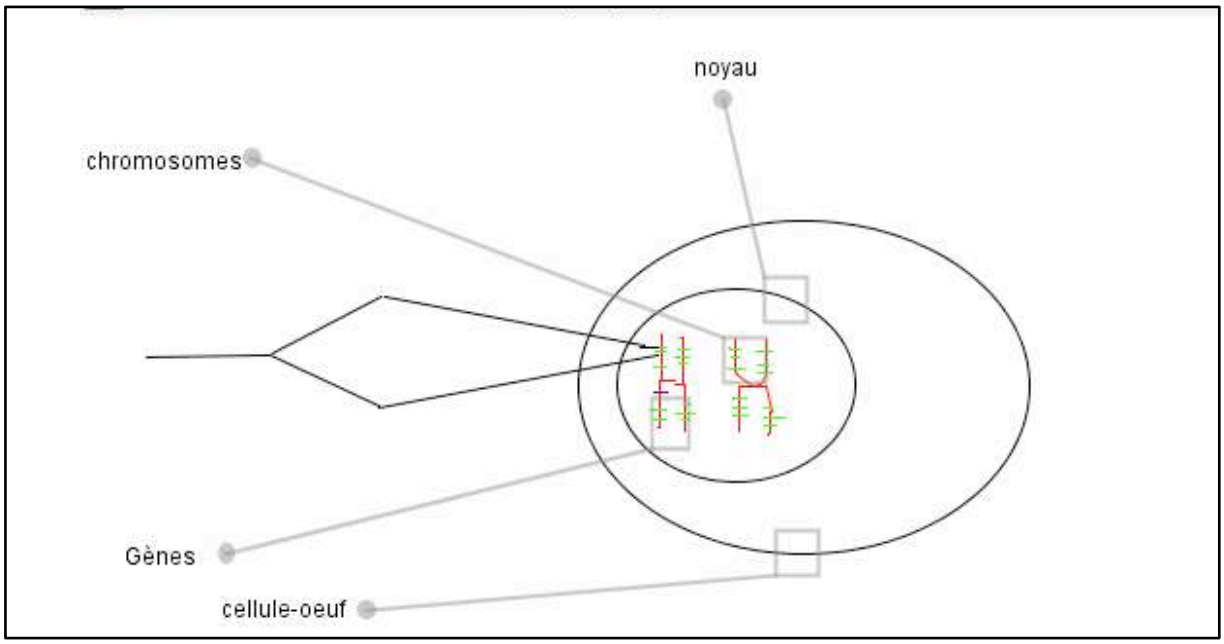
B. Nombre d'élèves par conception

Afin de vérifier si l'une des conceptions dégagées des productions des élèves est plus présente que les autres et si l'ensemble des élèves peut être associé à une conception, nous avons décidé d'analyser leurs productions avec chacune des neufs conceptions présentées ci-dessus.

Si l'on exploite ces conceptions sur les productions des élèves, nous pouvons obtenir, par exemple, le résultat suivant.

Vos idées pour la résolution du problème (rédigez un texte) :

- Modifier le gène voulu, en le remplaçant par celui que l'on veut, dans le noyau de la cellule œuf a sa formation.



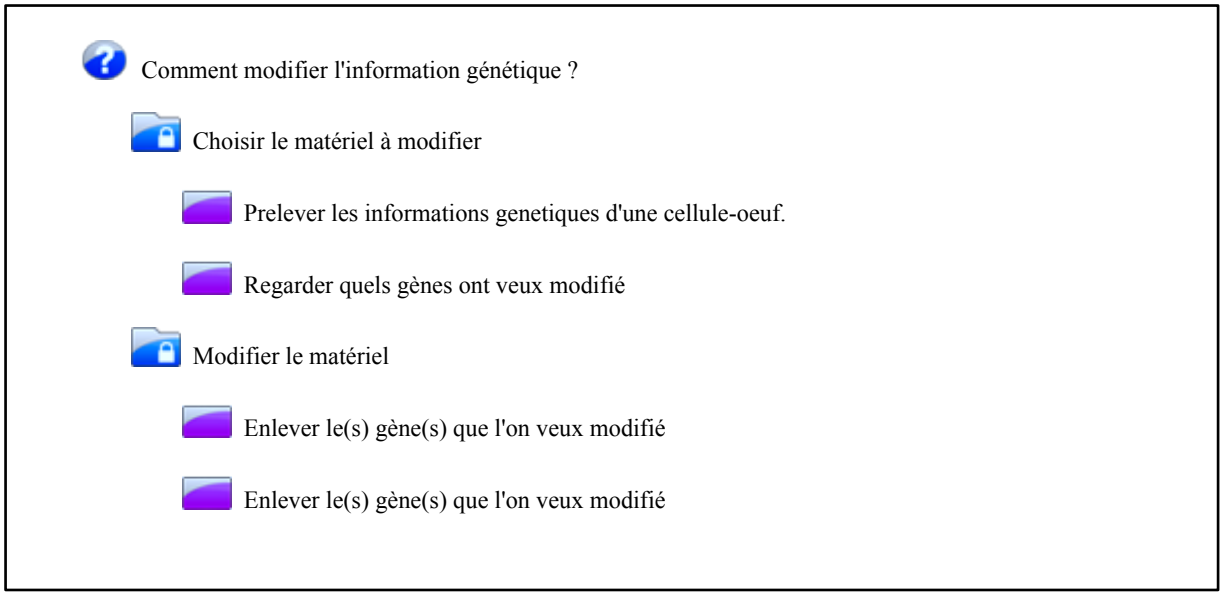


Figure 46 : Productions de l'élève 2

À partir des productions de l'élève 2, nous obtenons le tableau qui regroupe l'ensemble des opérateurs et des contrôles issus de ses texte, graphique et protocole.

Élève	Action	Représentation graphique	Connaissance exprimée	Connaissance déduite
2	Modifier le gène voulu en le remplaçant par celui que l'on veut, dans le noyau de la cellule œuf			Un gène peut être remplacé par un autre gène
			Le gène se trouve dans le noyau.	
			Le noyau se trouve dans la cellule.	La modification doit se faire dans une cellule œuf.
				Modifier l'information génétique en transférant un gène d'une cellule œuf à une autre.
		Les chromosomes sont dans le noyau.		
		Les gènes sont des barres sur les chromosomes.		
	Prélever les informations génétiques d'une cellule-œuf			L'information génétique est dans la cellule.

	Enlever les gènes que l'on veut modifier			Pour modifier un gène il faut l'enlever.

Tableau 30 : outil de diagnostic et de formalisation appliqué sur les productions de l'élève 2

Maintenant si nous analysons ce tableau avec les conceptions dégagées, nous obtenons la conception « Échange de gènes » pour cet élève. C'est à dire que parmi les actions et connaissances du tableau, quelles soient sous forme de texte ou de représentation graphique, trois items au moins appartiennent à la conception « Échange de gènes».

De cette façon, nous pouvons analyser l'ensemble des actions, connaissances et représentations graphiques issues des productions des élèves et obtenir les résultats suivants pour l'ensemble des élèves.

Conception	Échange cellule	Échange de noyaux	Échange chromosomique	Séparation d'un chromosome	Échange de gènes
Nombre	3	3	5	3	10

Conception	Echange de parties de gènes	Substitution de bases	Echange d'ADN	Appariement des bases
Nombre	2	12	5	2

Tableau 31 : Nombre d'élèves par conception

Nous ne pouvons pas associer les neuf conceptions avec les productions de tous les élèves, mais avec seulement la moitié. Cela peut être dû à plusieurs phénomènes. Tout d'abord, certains élèves ont plusieurs idées et proposent une action et une connaissance pour plusieurs d'entre elles. Ils ne choisissent pas d'explorer une conception plus amplement qu'une autre et d'en donner plus d'éléments. Nous ne pouvons donc pas leur attribuer une conception particulière.

D'autres élèves indiquent seulement une action, ce qui ne nous suffit pas pour affirmer que telle ou telle conception est représentative de la mobilisation des connaissances de ces élèves. Il manque notamment des justifications pouvant être qualifiée de connaissances.

Enfin, quelques élèves indiquent des actions et connaissances qui ne correspondent pas aux verbes d'actions et objets biologiques envisagés, et donc aux domaines de validité des réponses au problème prévus dans l'analyse *a priori*. Ces élèves ne peuvent pas non plus être rassemblés sous une conception à laquelle nous n'aurions pas pensé car ils expriment chacun des idées différentes, aucune ne rassemble au moins deux élèves.

C. Problèmes de vocabulaire et d'organisation des objets biologiques

L'analyse des productions des élèves nous a également fait approcher un autre problème : le vocabulaire. En effet, les élèves n'utilisent pas toujours à bon escient le nom des différents objets biologiques. Ils les confondent et utilisent un nom à la place d'un autre.

Ainsi nous pouvons remarquer que deux élèves confondent allèles et nucléotides. Trois autres utilisent le terme gène à la place d'ADN. Une confusion est également faite entre allèle et gène, le terme allèle est utilisé pour désigner un gène en général alors que c'est une valeur précise de ce gène. Cette confusion entre allèle et gène a été évoquée dans les résultats de plusieurs études et notamment celle de Wood-Robinson, Lewis et Leach en 2000.

Nous retrouvons ensuite diverses confusions à chaque fois chez des élèves différents :

- Confusion entre gène et chromosome
- Confusion entre ADN et chromosome.

La confusion entre gène et chromosome se retrouve dans l'étude menée par Lewis et Wood-Robinson (2000) sur les concepts de génétique mais par la voie de l'étude des mécanismes de transmission et d'hérédité. Ils démontrent qu'en plus de confondre les deux termes et les deux structures, les élèves n'arrivent pas à établir la relation qui unit ses deux objets biologiques.

> « Genes are frequently considered to be larger than chromosomes (…) In response to the question 'what are genes made up of? 25% of the sample (…) suggested chromosomes. » (Ibidem).

Un deuxième problème est apparu dans les productions de certains élèves. En effet, ils indiquent explicitement une organisation incorrecte des objets biologiques qu'ils citent. Nous retrouvons ainsi :

- L'embryon se trouve dans les ovules.
- Les chromosomes sont sur l'ADN.
- Les cellules sont sur les chromosomes.
- Les chromosomes sont dans les gènes.

Ces deux problèmes (confusion de termes et organisation biologique incorrecte) ne se retrouvent pas dans les productions de la majorité des élèves mais seulement chez certains élèves. Il serait pourtant intéressant de trouver un moyen pour aider les élèves à les dépasser.

II. Conclusion

Ces deux analyses, quantitative et qualitative, nous permettent d'exploiter les productions des élèves et d'en faire ressortir diverses informations.

Tout d'abord les élèves ont compris la situation et ont eu le temps de la réaliser puisqu'ils ont, pour le plus grand nombre, conçu les trois productions demandées. De plus, ces trois productions sont, pour la majorité, au même niveau, ce qui nous pousse à croire que les élèves ont développé dans le graphique et le protocole l'idée qui leur semblait la meilleure

et pour laquelle ils avaient donné le plus de renseignements dans la première production : le texte des idées. C'est aussi un indicateur d'une certaine cohérence intra-élève.

Nous pouvons également constater que certains niveaux sont plus cités que d'autres (Chromosome, Gène et ADN), trois ne le sont même presque pas (Milieu, Organe, Caryotype).

De plus, il apparaît qu'une part importante d'élèves n'indique pas la façon spécifique de modifier l'information génétique, mais reprend seulement le terme « modification » de la question en utilisant le verbe « modifier ». Pour les autres nous remarquons que les verbes « enlever » et « échanger » sont ceux qui, pour les élèves, correspondent le plus à une modification. En fait, lorsque l'on regarde les productions des élèves, les verbes « ajouter » et « enlever » sont peu utilisés pour la modification en elle-même. Ils permettent d'accéder à l'objet biologique à modifier. Ainsi, on les retrouvera souvent avant et après la modification pour extraire et replacer l'objet biologique modifié. Nous pouvons donc en déduire que le verbe qui, pour les élèves, correspond le plus à une modification est le verbe « échanger » et ses synonymes : remplacer, transférer à la place de …

D'ailleurs, c'est ce verbe qu'ils utilisent en majorité sur les objets biologiques qui sont les plus cités. Ces objets, la plupart objet principal de chaque niveau, sont tous parmi les objets étudiés en détail les années précédentes, contrairement aux autres objets possibles de chaque niveau.

Le dernier point dégagé de l'analyse quantitative porte sur le choix du niveau développé dans le graphique et protocole en fonction du niveau le plus bas du texte des idées (cf. Figure 36). Nous avions fait l'hypothèse que si les élèves ne développaient pas le niveau le plus bas, c'est qu'ils ne maitrisaient pas l'articulation des différents niveaux biologiques et l'organisation biologique générale. D'après nos résultats et cette hypothèse, nous pouvons conclure que les élèves n'ont pas tous conscience de l'articulation des niveaux biologiques. Mais pour les élèves qui développent le niveau le plus bas, on ne peut pas affirmer non plus qu'ils possèdent la connaissance de ces articulations. Notre méthode d'analyse est à revoir afin de pouvoir fournir une réponse justifiée à cette hypothèse.

Enfin, l'analyse qualitative nous permet de constater que sur l'ensemble des conceptions modélisées, trois apparaissent de façon plus importante que les autres. Ces trois conceptions sont : « Échange de gènes », « Échange d'ADN » et « Substitution de bases ». Elles correspondent au même verbe d'action : « échanger » sur le même objet biologique, « une succession de nucléotides », qui peut prendre différentes formes : Gène, ADN, nucléotide.

Nous pouvons également remarquer que parmi ces neuf conceptions, deux ne sont pas biologiquement correctes. Il s'agit des conceptions « Échange de cellules » et « Échange de noyaux ».

L'ensemble de ces résultats, quantitatifs et qualitatifs, vont nous permettre de répondre à nos questions et hypothèses de recherche dans la partie suivante : la discussion.

Quatrième partie : Discussion - Conclusion

Chapitre VII : Discussion et Perspectives

Lors de ce travail de thèse, je souhaitais, lors de l'élaboration d'une expérience comprenant l'élaboration d'un protocole expérimental, étudier la mobilisation des connaissances des élèves afin de réaliser le diagnostic et la formalisation de leurs conceptions. L'expérience que les élèves ont eu à réaliser est une expérience de pensée (Gooding, 1992), cela implique qu'ils n'ont jamais réalisé l'expérience proposée et que ce n'était pas un des objectifs de la situation. J'ai alors élaboré une situation pour la recherche, à partir d'une analyse *a priori* basée sur la Théorie des Situations Didactiques (Brousseau, 1998) et le modèle cK¢ (Balacheff, 2005).

L'étude que j'ai menée m'a permis de réaliser mes objectifs avec un degré de plus ou moins complète satisfaction. Mais des interrogations sont apparues et je souhaite maintenant, dans cette discussion, analyser si leur résolution a été possible. Ces questions sont les suivantes :

- Quelles sont les principales conceptions des élèves sur l'information génétique ?
- Le modèle cK¢ est-il opérationnel dans le cadre où nous nous sommes placé ? Quels sont les indicateurs de notre outils de diagnostic, construit à partir de ce modèle, présents dans les productions d'élèves pour modéliser leurs conceptions ?
- Le fait de faire réaliser aux élèves trois productions est-il important ? Ces trois productions sont-elles complémentaires pour le diagnostic ?
- LabBook, avec nos conditions d'utilisation, est-il profitable pour le recueil et l'analyse des productions ?
- Le modèle cK¢ est-il pertinent pour formaliser les conceptions en SVT et créer un outil de diagnostic des conceptions ?

La première interrogation, la détermination des conceptions des élèves, est tout de même le point central de cette étude.

I. Retour sur la question et les hypothèses de recherche

1) Conceptions des élèves

L'analyse des production des élèves nous a permis de modéliser neuf conceptions grâce à l'outil que nous avons développé à partir du modèle cK¢ (Balacheff, 1995). Ces conceptions ont pu être attribuées à 46 élèves.

Sur ces neuf conceptions, huit font appel au même verbe d'action, le verbe « échanger ». Il existe donc, pour 41 élèves sur les 94 ayant réalisés la situation, un lien direct entre l'échange et le fait de faire une modification de l'information génétique. Cela ne correspond pas à ce que faisait remarquer Albaladejo (1988) dans son étude : « Mutation is strongly associated with the idea of change » [le terme mutation est très fortement associé à l'idée de changement]. Cette notion de changement est différente de celle d'échange que l'on retrouve dans les productions des élèves et à laquelle nous ne nous attendions pas.

Nous pouvons remarquer que ces conceptions se concentrent principalement sur 5 niveaux biologiques (Cellule, Noyau, Chromosome, Gène et ADN). Ces cinq niveaux correspondent aux plus bas niveaux biologiques proposés dans la situation. Ce sont également les derniers niveaux étudiés par les élèves lors de l'enseignement de la génétique (en troisième et en seconde).

À chaque niveau ne correspond pas une seule conception. En effet, trois niveaux regroupent plusieurs conceptions : Chromosome, Gène et ADN. Ils sont présentés dans l'enseignement secondaire comme étant les porteurs de l'information génétique. Nous faisons l'hypothèse que la prédominance de ces niveaux dans les conceptions des élèves est en lien avec l'enseignement récent qu'ils ont suivis et le rapport direct (rôle de support) qui a été établi, dans l'enseignement, entre eux et l'information génétique.

Parmi ces conceptions, le niveau biologique le plus représenté (20 élèves sur 46) est celui de l'ADN qui correspond au dernier niveau biologique enseigné. Sept de ces neuf conceptions portent sur l'objet biologique principal de chaque niveau. Ces objets étant étudiés de façon plus importante en classe, en terme de temps qui leur est consacré, de poids qui leur est associé, leur prédominance était attendue et se confirme dans nos résultats.

Les deux conceptions qui ne concernent pas des objets biologiques principaux, impliquent les bases nucléotidiques de l'ADN, objet secondaire du niveau ADN. Ces bases étant étudiées comme le support, l'écriture du programme génétique de chaque individu et comme étant les cibles des mutations génétiques, c'est naturel qu'elles soient présentent dans les conceptions. De plus, la réponse optimale au problème posé aux élèves est une modification de l'ordre de ces bases par ajout, délétion, duplication ou substitution d'une ou plusieurs bases.

Nous remarquons d'ailleurs que la conception portant sur la substitution des bases est celle qui rassemble le plus d'élèves (12). C'est la plus importante des conceptions que nous avons dégagées et formalisées.

Lorsque l'on regarde ces neuf conceptions, un autre constat est possible : deux des conceptions portent sur les niveaux Cellule, et Noyau. L'apparition de ces deux conceptions nous étonne car elles concernent deux objets biologiques qui ne sont pas enseignés comme support de l'information génétique. Par contre, il est vrai qu'une confusion est possible, surtout avec le noyau qui est décrit, dans les programmes scolaires, comme contenant l'information génétique. Le noyau étant dans la cellule, la cellule contient également l'information génétique. La modification du contenant d'un objet biologique, son transfert ou son échange va également modifier le contenu. C'est le raisonnement que les élèves ont du mettre en place pour que l'on obtienne les caractéristiques nécessaires à la formalisation de ces conceptions (éléments de diagnostic : action ou connaissance, sous forme de texte ou de représentation graphique) dans leurs productions.

Ces conceptions ne sont pas biologiquement correctes, puisque l'information génétique n'est pas directement modifiée. Mais elles sont compréhensibles vis à vis de l'enseignement que les élèves ont reçu et de l'organisation générale biologique qui comprend des objets biologiques emboîtés les uns dans les autres.

Nous avons pu modéliser et formaliser ces neuf conceptions grâce à la situation que nous avons construite et mise en place et dont la structuration particulière permet aux élèves de mobiliser leurs connaissances : la réalisation de trois productions pour élaborer une expérience, l'utilisation d'un logiciel étayant cette élaboration et principalement celle du protocole de cette expérience.

2) Elaboration d'expérience et problème adaptés au diagnostic

La situation que nous avons développée présente des particularités afin de pouvoir diagnostiquer les conceptions des élèves : la réalisation de trois productions, l'utilisation d'un logiciel pour élaborer une expérience par la pensée.

Nous avons cherché à savoir si une situation sous forme d'un problème à résoudre et avec une expérience virtuelle à réaliser, avait une influence sur les conceptions mobilisées par les élèves.

Une situation présentée sous cette forme permet à l'élève de s'investir dans la résolution du problème et d'en être l'acteur en élaborant des productions personnelles. En effet, les élèves ont presque tous réalisé l'ensemble des productions et ils ont donné de nombreuses informations et détails sur le sujet sur lequel ils étaient interrogés : la modification de l'information génétique. Nous pouvons ensuite remarquer que le fait d'interroger les élèves sur la modification de l'information génétique nous a bien mené au diagnostic de différentes conceptions. En effet, l'hétérogénéité des réponses des élèves permet de constater que la situation ne les a pas tous orientés vers un même niveau biologique, ou vers un même objet biologique à modifier ou vers un même mode de modification (verbe d'action). Nous avons pu identifier le niveau biologique auquel l'élève situe l'information génétique, sur quel objet biologique il se la représente et de quelle façon il pense la modifier.

Nous avons également voulu savoir s'il est possible de modéliser les conceptions des élèves sur une notion biologique en leur faisant élaborer une expérience. Plusieurs travaux ont montrés comment les connaissances sont mobilisées lors de l'élaboration de protocoles expérimentaux avec l'expression des idées sous forme d'actions, la justification des choix de matériel, de techniques (Girault et al., 2010). Nos résultats permettent de représenter ces connaissances sous un formalisme particulier, adapté au modèle cK¢.

Mais le fait de faire élaborer aux élèves une expérience n'est pas seul responsable dans le fait d'avoir pu diagnostiquer les conceptions des élèves à partir de notre situation. En effet, la structuration de la situation en trois étapes et la présence des trois productions à réaliser, dont deux pour formaliser les hypothèses, ont été déterminantes comme nous allons le montrer ci-dessous.

3) Trois productions complémentaires

En mettant en place trois productions pour répondre au même problème, nous voulions tester plusieurs points. Tout d'abord, est-ce qu'elles allaient permettre à l'élève de répondre au même problème mais selon trois approches différentes ? D'autre part, est-ce qu'elles

permettent d'obtenir des informations complémentaires pour réaliser le diagnostic des conceptions des élèves ?

L'interrogation sur la complémentarité des productions et la possibilité de dégager une conception de l'ensemble est levée. Les productions sont bien complémentaires car, pour le diagnostic de conceptions, elles n'apportent pas toutes les mêmes actions et connaissances, sous forme de texte ou de représentations graphiques dans le cadre de notre outil de diagnostic construit à partir du modèle cK¢.

La réalisation de ces trois productions permet de diagnostiquer une conception, ce qui n'aurait été possible que pour très peu d'élèves s'il n'y avait eu qu'une ou deux productions à réaliser, car souvent, les éléments de diagnostic pour formaliser la conception sont répartis entre les trois productions. Il a donc fallu la coexistence des trois productions pour obtenir les deux actions et une connaissance (ou l'inverse) et attribuer une conception à un élève par l'analyse de ses productions. De plus, notre impression est que certains élèves s'expriment plus facilement par le texte et d'autres par le graphique. Cela rejoint Prain, Hand et Hohenshell (2001) pour qui chaque élève a un mode de représentation propre. Il y a donc parfois plusieurs éléments de la même conception dans une production, rien dans la suivante et le dernier, qui permet la détermination, dans la dernière production. On observe donc une hétérogénéité entre les différentes productions. D'autre part, certains détails, pourtant connus par les élèves (comme la structure ou l'organisation d'un objet biologique), ne seraient pas apparus et nous n'aurions pu attribuer une conception à certains élèves par manque d'une action ou d'une connaissance exprimée dans une autre production de nature différente. Ce sont ces représentations multimodales qui permettent, d'obtenir les éléments de l'outil de diagnostic nécessaires à l'attribution des conceptions. Une piste de prolongement de cette étude serait de quantifier les élèves qui s'expriment plus facilement par le texte et ceux qui le font par le graphique.

Ces productions étant toutes de nature différente, nous nous demandions également si les élèves arriveraient à répondre au problème dans chacune d'entre-elles, par la même idée principale. D'après l'analyse des productions, nous constatons que c'est le cas pour 2/3 des élèves (61) ayant participé à l'expérimentation finale, il y a donc une homogénéité entre leurs productions, une cohérence intra-élève.

Mais pour les 33 élèves restant, le niveau biologique et l'objet biologique ne sont pas identiques sur les trois productions. On trouve une hétérogénéité dans leurs réponses. Ainsi certains élèves développent la même idée dans le schéma et le texte et cette idée était celle pour laquelle ils donnaient le plus de détails dans la partie texte des idées. Mais pour ce qui est du protocole, la troisième forme de production que nous demandons, il y a une différence, le niveau biologique n'est pas le même. Cette différence de niveau attribué entre les trois productions peut être due à plusieurs phénomènes. Une explication possible est qu'au cours de la réalisation de la situation, l'élève peut changer d'idée car, le fait de réaliser les productions, de se poser plus de questions fait évoluer son raisonnement. Mais comme ils n'ont pas le droit de revenir sur les productions déjà effectuées et enregistrées, ils ne peuvent les modifier. Comme ils veulent quand même développer leur nouveau raisonnement, ils le font pour les productions qui ne sont pas encore enregistrées. Ainsi nous obtenons des idées et des niveaux biologiques différents pour un même élève sur ses trois productions.

Une autre explication possible sur l'obtention de ce résultat est le fait que l'on retrouve des élèves qui donnent beaucoup de détails sur une idée de modification de l'information génétique dans la première production mais en développe une autre par la suite. Les productions sont alors de niveau biologique différent et concernent des objets biologiques et des modes de modifications différents.

Il y a aussi quelques élèves qui donnent beaucoup plus de détails sur la façon d'arriver à l'objet biologique, que sur l'action de modification en elle-même. Par exemple, un élève va détailler l'extraction de la cellule dans une de ces productions, pour ensuite échanger le

noyau qui est dans la cellule. L'analyse des termes employés par les élèves étant quantitative, c'est le niveau qui contient le plus de détails qui est gardé et dans ce cas là, pour la production qui détaille l'extraction de la cellule, le niveau sera différent. L'élève n'aura pas toutes ses productions au même niveau.

Nous avons pu également constater que certains élèves se laissent guider par les propositions du logiciel sans adapter vraiment leurs idées et développer l'expérience qu'ils avaient élaborer dans les deux premières productions. Par exemple, un élève décrit une expérience d'échange de cellules dans les deux premières productions, mais dans le protocole, il décide d'échanger les membranes des cellules. Il a été influencé par la présence du matériel biologique « membrane ». Les trois productions ne présentent donc pas le développement de la même idée, même si dans ce cas là, le niveau biologique est identique.

Le fait de demander à un chercheur quel protocole ouvrir après le contrôle des productions « texte des idées » et « dessin » est une forte contrainte de milieu.

De plus, cela entraine une adaptation importante lors de l'ouverture du protocole par la présence d'une liste de matériel défini pour chaque niveau. En effet, même si le niveau reste, théoriquement, identique entre le graphique et le protocole, quelques élèves changent d'objet biologique comme nous l'avons vu plus haut (changement du matériel biologique de cellule à membrane cellulaire). La liste de matériel présente dans l'éditeur de protocole a donc influencé l'élève et l'a fait changer d'idée.

Nous verrons dans la partie « 7) Retour sur notre situation et son analyse », des solutions proposées pour diminuer l'impact de ces contraintes et structurations sur les élèves réalisant la situation.

Les deux points suivants sur lesquels nous nous interrogions au début de notre étude concerne le diagnostic en lui-même et les moyens d'analyse des productions des élèves mis en place pour en dégager des conceptions. Ils portent sur l'utilisation de deux outils : le logiciel LabBook et l'outil de diagnostic créé à partir du modèle cK¢.

4) Avantages de LabBook pour notre projet

Dans la situation que nous avons mise en place, les élèves réalisent leurs productions sur le site web LabBook. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel LabBook, en premier lieu, parce que c'est une plateforme développée pour étayer l'élaboration d'une expérience et notamment l'élaboration d'une des productions que nous souhaitons faire réaliser aux élèves : le protocole expérimental et sa structuration en étapes et en actions. Nous avons également choisi cette plateforme car elle présente une facilité d'utilisation.

De plus, concernant notre sujet biologique, la modification de l'information génétique, la réalisation d'expériences, réelles ou par simulation, par les élèves est difficile à mettre en œuvre. LabBook permet ainsi de mettre à leur disposition un environnement pseudo-expérimental avec la proposition d'une liste d'éléments biologiques. Les élèves se retrouvent donc dans une situation où ils élaborent une expérience et tout en sachant qu'ils ne vont pas la réaliser, comme c'est le cas d'une expérience de pensée. Le fait que l'expérience soit ou non biologiquement possible n'est pas un paramètre qui a été pris en compte au moment de la création de la situation (ce que nous verrons dans la partie 7) de ce chapitre), par contre l'éditeur de protocole et la liste de matériel qui a été anticipée à partir de l'analyse *a priori* introduit du réalisme dans la situation.

Nous pensions également que l'utilisation d'un logiciel informatique favoriserait l'accès des productions des élèves au chercheur par une standardisation des traces et des productions des élèves. L'analyse des productions et le diagnostic nous ont montré que nous avons eu raison de suivre cette idée. Il est préférable pour diagnostiquer une conception selon le modèle cK¢, d'avoir des productions standardisées pour pouvoir dégager plus facilement les actions et connaissances exprimées avec sur les différents modes de représentation (texte et graphique). Cette aide de LabBook, par une standardisation des productions, n'est vraie que pour l'éditeur de protocole car les autres éditeurs ne sont pas contraints par des choix faits par les chercheurs, mais pourraient l'être pour de futures études. Le fait d'avoir contraint les élèves lors de l'élaboration de leurs protocoles avec l'outil informatique (structure, vocabulaire, …) est une grande aide pour le diagnostic.

Cependant, pour utiliser LabBook il était nécessaire que notre situation soit adaptée à l'outil informatique. Pour nous aider dans cette adaptation, nous avons également utilisé le modèle cK¢ qui nous a permis de formaliser l'ensemble de notre situation avant de l'implémenter dans le logiciel.

5) Le modèle cK¢, outil de notre étude

Le modèle cK¢ est présent tout au long de notre étude. Il n'a pas seulement été utilisé lors de la création de la situation pour formaliser les connaissances en jeu, mais également pour la création des grilles d'analyse des productions des élèves ainsi que lors de la modélisation des conceptions des élèves et de la construction de l'outil de diagnostic des conceptions.

Le modèle cK¢ ayant été créé pour la modélisation des conceptions en mathématiques lors de la résolution de problème, il a été nécessaire de prendre en compte certaines contraintes pour le rendre applicable à notre situation et la notion biologique étudiée.

L'application à notre situation a demandé une adaptation des paramètres du quadruplet à l'élaboration d'expérience et notamment de protocole. Par exemple, les opérateurs dégagés de notre situation ne sont pas des techniques employées par l'élève pour résoudre le problème comme le montrait notre exemple Chapitre III.II.3) : « P : Problème de type : Combien font 16 et 4 ? (…) R : Prononcer les nombres tout en déployant les doigts successivement. ». Dans notre situation, l'outil que nous avons créé à partir de ce modèle, nous permet d'identifier des actions (un verbe d'action agissant sur un objet biologique) comme étant des opérateurs du modèle. On attribue également le statut d'action à certaines représentations graphiques lorsqu'elles représentent des actions de modification. D'autres représentations graphiques sont des connaissances qui peuvent, dans le modèle, correspondre aux contrôles.

Les systèmes de représentations lors de la modélisation sont assimilés au type de production : texte pour l'énoncé des idées, la légende et le protocole, et graphique pour le schéma.

Enfin, les contrôles du modèle correspondent aux éléments de connaissances que les élèves donnent pour justifier l'expérience qu'ils ont choisi de réaliser, essentiellement dans l'énoncé des idées. On retrouve d'autres éléments de contrôles dans cette partie ainsi que sur le graphique, qui sont des caractéristiques des objets biologiques considérés par l'élève dans son expérience ainsi que, parfois, des conséquences de la modification proposées par l'élève. Il n'y a pas de contrôle expérimental car les élèves ne réalisent pas l'expérience par la suite.

Utiliser ce modèle pour réaliser nos différents objectifs, suppose, également, que la modélisation des concepts avec lesquels nous souhaitons travailler, la modification de l'information génétique, soit possible avec ce modèle. Dans notre cas, la modélisation a été réalisable car la notion que nous avons choisie est une notion bien définie, qui ne fait pas appel à de nombreuses connaissances « à tiroir », qui ne sont pas imbriquées les unes dans les autres. Nous reviendrons sur cette notion de connaissances « à tiroir » dans le paragraphe II 1) de ce chapitre.

Pour adapter le modèle cK¢ à la notion biologique sur laquelle nous souhaitions travailler, nous avons modélisé toutes les connaissances liées à la notion en jeu dans le cadre de notre situation et de notre problème. Nous avons ainsi envisagé toutes les combinaisons possibles entre les verbes d'action et les objets biologiques dégagés de notre analyse du savoir. Pour que la modélisation de toutes ces combinaisons soit complète, principalement en ce qui concerne les contrôles, nous avons développé des actions et des conséquences qui ne sont pas, parfois, biologiquement ou éthiquement correctes ou irréalistes pour ces élèves.

Grâce au développement et à l'adaptation du modèle cK¢ à notre situation et aux concepts biologiques, nous pouvons l'utiliser dans notre étude dans une optique de systématisation du diagnostic, même si cela a été fait par une personne humaine, le chercheur.

Grâce à l'ensemble de cette modélisation nous avons pu proposer aux élèves des protocoles expérimentaux avec des listes de matériel pour réaliser leurs protocoles et adaptées au niveau auquel ils souhaitaient modifier l'information génétique. Cette modélisation a également permis de faire des hypothèses sur les conceptions. Nous avons pu envisager celles qui avaient la plus grande probabilité d'apparaître dans les productions des élèves.

La notion biologique étudiée, ainsi que l'élaboration d'expérience sont deux conditions de ce travail qui ont nécessité une adaptation du modèle pour une utilisation optimale. La modélisation que nous avons réalisée pourrait être transposée à d'autres domaines sous certains conditions (comme nous le verrons dans la partie II.1 de ce chapitre). Les conditions à mettre en œuvre pour développer un tuteur informatique s'appuyant sur cette modélisation sont à définir dans un prolongement de cette étude.

6) Liens avec les autres études du domaine

Notre recherche nous a permis de confirmer que les élèves français ont aussi des difficultés avec la notion d'information génétique et principalement avec les liens et l'organisation des différents niveaux biologiques impliqués en génétique. En effet, ils situent l'information génétique à tous les niveaux biologiques. Sur la totalité des réponses des élèves, nous constatons que l'ensemble des niveaux biologiques, du Milieu à l'ADN, ont été choisis. Cela avait déjà été montré, avec des élèves du même âge de divers pays, par les auteurs cités dans le chapitre II, comme Bahar et al. (1999) au Royaume-Uni et Knippels et al. (2005) au Danemark ou encore Duncan et Reiser (2007) aux Etats-Unis. Dans ces différentes études, les auteurs parlaient de difficultés dues :

- au vocabulaire du domaine de la génétique,
- à l'intervention de modèles mathématiques,
- au degré d'abstraction nécessaire à la compréhension des objets biologiques les plus petits (invisibles et inaccessibles) et
- à l'existence des notions biologiques liées à la génétique sur plusieurs niveaux biologiques.

Ces difficultés se traduisent, dans notre cas, par le fait que certains élèves confondent les différents objets biologiques impliqués en génétique. Ainsi, les termes gènes et allèles sont utilisés par certains de nos élèves sans distinction comme l'avaient déjà remarqué Wood-Robinson, Lewis et Leach (2000). Pour d'autres, les nucléotides sont appelés allèles et les gènes sont représentés sous une forme de X comme les chromosomes. Ce sont des exemples parmi d'autres, mais nous retrouvons, dans plusieurs productions, des erreurs liées au vocabulaire employé et aux définitions données aux objets biologiques, comme nous l'avons vu dans la partie I.2)c. du chapitre Résultats. Nous avons également constaté que les élèves ont des difficultés avec les différents niveaux biologiques impliqués. C'est très visible, par exemple, quand ils ne lient pas les niveaux de façon correcte (cellule sur un chromosome) ou quand ils proposent des emboîtements inverses de niveaux biologiques. Ainsi un élève place la cellule dans le noyau, un autre élève propose de rajouter une cellule sur un bras du chromosome ou un troisième place le chromosome dans le gène, ce que Lewis et Wood-Robinson (2000) avaient déjà mis en évidence.

Ces difficultés que nous avons mises en évidence dans les productions des élèves peuvent être dues à certains des obstacles et des difficultés que nous avons identifiés dans les chapitres I et II sur le savoir :

- les différentes formes support de l'information génétique : l'ADN, les chromosomes, les gènes…,
- l'emboitement des différents niveaux biologiques,
- l'association entre le niveau information du gène et son niveau physique,
- le rôle des protéines dans le métabolisme et
- le lien avec l'expression des caractères.

En plus de confirmer les résultats des études menées auparavant et concernant les difficultés des élèves, nous avons cherché à développer les classifications des niveaux biologiques posant des difficultés aux élèves et proposées par les auteurs précédents. Les niveaux proposés par Bahar et al. (1999), macroscopique, sub-microscopique et symbolique ou ceux proposés par Marbach-Ad et Stavy (2000), macroscopique, microscopique et moléculaire, ont été renforcés, détaillés et modélisés. Nous avons ainsi construit et expérimenté neuf niveaux. Ces neuf niveaux peuvent être rassemblés deux par deux (dans un regroupement on en retrouve trois), pour obtenir une classification proche des deux présentées ci-dessus et établir un parallèle. Nous obtenons alors des difficultés et des conceptions réparties dans les catégories :

- macroscopique : contient tout ce qui peut se voir à l'œil nu, sans faire appel à du matériel technique de visualisation. Cette catégorie correspond aux niveaux macroscopique des études présentées. Dans notre étude, cette catégorie rassemble les niveaux Milieu, Organisme et Organe.
- Cellulaire : regroupe tous les éléments du même ordre de taille que la cellule qui peuvent être observés au microscope optique. Elle correspond au niveau sub-micro de Bahar et microscopique de Marbach-Ad. Les niveaux Cellule et Noyau de notre étude font partie de cette catégorie.
- Ultra-cellulaire : rassemble les niveaux Caryotype et Chromosome qui, parfois, nécessitent l'utilisation d'un microscope électronique en plus du microscope optique. Cette catégorie n'a pas d'équivalent exact dans les deux classifications présentées mais peut être également inclue dans celle des niveaux sub-micro et microscopique.
- Moléculaire : comprend les niveaux Gènes et ADN qui sont accessibles grâce à l'utilisation de microscopes électroniques et qui nécessitent un fort degré d'abstraction pour être compris. On ne retrouve une correspondance qu'avec Marbach-Ad et son niveau moléculaire car pour la classification de Bahar, c'est encore au niveau sub-micro qu'il correspond.

Les catégories prédéfinies par ces auteurs correspondent donc partiellement aux nôtres.

L'ensemble des travaux de didactique que nous avons étudiés portent tous sur la génétique mais prennent des chemins différents pour arriver à dégager les difficultés des élèves et/ou leurs conceptions. Certains auteurs s'intéressent à la traduction et la synthèse des protéines, quelques-uns passent par la transmission des caractères héréditaires pour interroger les élèves. Enfin, d'autres posent directement des questions sur la notion de gènes ou l'ADN. Dans notre étude, pour accéder aux conceptions des élèves, nous somme passés par la modification de l'information génétique. Malgré ces nombreuses différences, un point commun persiste entre toutes ces recherches : la volonté de travailler sur le savoir génétique des élèves, d'en dégager des obstacles pour ensuite faire des propositions afin que les élèves puissent les dépasser.

Néanmoins, un point particulier différencie notre étude de celles réalisées précédemment, c'est la proposition d'un diagnostic des conceptions basé sur un modèle formel. Ces conceptions seront identifiées en terme d'actions et de connaissances sur des registres de représentation textuel et graphique. Il existe bien des études où les auteurs parlent de conceptions et cherchent à connaître celles que l'on peut attribuer aux élèves. Il s'agit, par exemple, du travail de Tsui et Treagust (2007) qui, à partir de l'analyse d'un pré-test et d'un post test, veulent évaluer l'évolution des conceptions des élèves après un enseignement incluant le logiciel BioLogica. Ils cherchent également à caractériser ce changement conceptuel en attribuant aux conceptions un statut conceptuel issu de la caractérisation de Thorley (1990) (Intelligible, Plausibility, Fruitful). Les cinq conceptions qu'ils prennent en compte sont les suivantes : « A gene is from parents/grandparents ; A gene determines a trait/characteristic ; A gene is/part of a chromosome ; A gene is/part of DNA; A gene is information for making proteins". Mais cette étude présente deux problèmes vis à vis de ces conceptions. Tout d'abord, nous ne savons pas comment les conceptions qui vont être attribuées aux élèves ont été construites. Il est juste indiqué que ces conceptions sont celles des élèves. L'autre problème est l'attribution de telle ou telle conception à un élève. La façon dont les auteurs attribuent ces conceptions correspond à une interprétation de ce que les élèves disent ou écrivent mais sans mettre en œuvre de critères de sélection. Cette attribution n'est donc pas objective.

Une autre étude étudiant les conceptions des élèves sur les gènes est celle de Khattech et Orange (2005). Pour ce travail, nous avons plus d'information concernant l'origine des conceptions, elles correspondent aux différentes étapes de la découverte du concept de gène : « Gène : entité matérielle ; Gène : un caractère ; Gène : génotype ; Gène : Unité de fonction ; Gène : unité de transcription. ».

Nous ne pouvons comparer nos résultats avec ceux de ces études, notamment parce que nous ne nous attachons pas à étudier les conceptions des élèves sur la signification du concept de gène.

Notre étude s'attache à formaliser et diagnostiquer les conceptions des élèves en utilisant des critères définis et en les appliquant à l'ensemble des productions des élèves. C'est ce qui la différencie des études précédentes et apporte une contribution dans la détermination des conceptions des élèves. De plus, dans notre travail, nous ne nous intéressons pas aux conceptions des élèves sur le gène uniquement, mais sur la modification de l'information génétique qui peut inclure celles sur le gène ainsi que les conceptions sur tous les objets biologiques intervenant dans notre situation. L'analyse des conceptions issues de notre travail mène à des obstacles que les élèves auront à surmonter pour maitriser la notion de modification de l'information génétique et savoir la réinvestir. Nous proposons des remédiations possibles, dans les perspectives, afin qu'ils puissent dépasser ces obstacles (II.6)).

7) Retour sur notre situation et son analyse

L'ensemble de notre expérimentation, qui comporte trois étapes, nous a permis de tester la situation finale que nous avons mise en place à partir de la modélisation du problème. Bien que cette situation nous ait permis de répondre à l'ensemble de nos questions, et de réaliser nos objectifs, plusieurs points seraient à revoir et à améliorer.

Tout d'abord, afin que l'ensemble des élèves ait le temps de réaliser toutes les productions et ce de façon correcte et sans être stressés par le temps, il serait nécessaire d'expérimenter notre situation sur un temps plus long, 1h30 serait, je pense, l'idéal.

Le deuxième point à revoir est l'orientation des élèves vers le protocole : le choix fait par le chercheur d'orienter un élève vers un protocole dont le niveau biologique est défini à partir de l'analyse intuitive des ses deux premières productions. En effet, le fait que ce soit un chercheur qui oriente l'élève n'est pas totalement objectif, et deux fois, il y a même eu une mauvaise orientation. Cette non correspondance du niveau du protocole vers lequel les élèves ont été orientés et de celui développé dans les deux premières productions est minime. Mais cela s'est produit même si le chercheur disposait d'une méthodologie, de critères, pour proposer un niveau biologique donné. L'utilisation d'un diagnostic automatique pour orienter les élèves vers le protocole à ouvrir à partir de leurs deux premières productions (comme nous le verrons plus loin) pourrait palier ce problème. Mais comme nous l'avons vu pour certains élèves, le protocole qu'ils rédigent ne correspond pas à l'idée qu'ils développent avant. Ils changent d'avis au cours de la situation.

Une solution serait peut être de ne pas proposer une liste de matériel et de supports biologiques en lien avec un niveau biologique donné et de proposer le même protocole pour tous les élèves mais sans matériel biologique. Les élèves n'auraient à leur disposition que les verbes d'action possibles.

Cette solution permettrait également de résoudre un autre problème : celui de l'influence de la présence du matériel biologique. En effet, nous avons rassemblé les objets biologiques par niveau, et le niveau du protocole proposé à l'élève correspond à celui qu'il détaille dans son texte des idées et développe dans son graphique. Mais nous remarquons que certains élèves modifient un objet biologique auquel ils n'avaient pas pensé dans les deux productions précédentes. Cela représente donc un problème, dû à la présence de tous les objets biologiques d'un niveau. En réalisant un seul protocole dans lequel les objets biologiques n'apparaitrait pas, cela permettrait peut être de résoudre ce problème, les élèves ne seraient pas tentés de modifier un objet biologique auquel ils n'avaient pas pensé avant et resteraient sur leur première idée développée et représentée dans le graphique.

Un quatrième point de la situation pose problème et concerne toujours le protocole. En effet, les protocoles sont construits à partir de la modélisation et de l'application de tous les verbes d'action sur l'ensemble des objets biologiques. Chaque protocole propose donc l'ensemble des combinaisons possibles pour un niveau donné, sans prendre en compte l'éthique (manipulation d'êtres vivants) ou le réalisme (par exemple, l'échange de l'enveloppe de deux organes) lié à certaines combinaisons. Le fait de dire aux élèves qu'ils peuvent tout faire, réaliser toutes les expériences qu'ils imaginent permet, certes, de récolter un très large éventail de productions, mais laisse une part trop importante à l'assimilation du vivant à un objet inerte.

Une solution pourrait être de continuer à proposer aux élèves l'ensemble des combinaisons possibles mais en n'autorisant pas l'inscription dans le protocole de celles qui ne sont ni réalistes, ni respectueuses de l'éthique. L'association, à ce refus, d'explications sur l'éthique et les possibilités techniques et technologiques de manipulation aiderait les élèves à comprendre pourquoi certaines combinaisons ne sont pas possibles. De plus, cela susciterait chez eux un questionnement sur l'éthique. Par exemple, pour le niveau organisme, la

manipulation d'êtres humains ou de mammifères n'est pas respectueuse des lois sur l'éthique en France (Code Rural – Art. R214-87 à R214-130, version en vigueur le 15 juillet 2009).

Une autre solution serait de faire un tri dans les combinaisons possibles et de ne proposer, à chaque niveau que les actions réalisables du point de vue technique et éthique, mais nous ne serions plus dans le cas de l'élaboration d'une expérience de pensée.

Il serait également possible d'ajouter le matériel technique à utiliser pour chaque niveau (seringue de prélèvement, microscope, pipette, tube à essai, appareil à UV…) sans spécifier le lien entre matériel et action. L'explicitation de ce lien contraindrait trop l'utilisateur de l'éditeur de protocole en ne le laissant pas libre de ces choix. Mais le fait de connaître le matériel qu'il est possible d'utiliser et sa méthode d'utilisation (description obtenue en cliquant sur chaque matériel) permettrait à l'élève de choisir des combinaisons « verbe d'action – objet biologique » plus réalistes et en tous cas réalisables avec le matériel proposé.

L'ensemble de ces mesures pour modifier l'interface logicielle de l'éditeur de protocole (COPEX) proposée aux élèves leur permettrait de mieux maitriser la rédaction du protocole. Nous avons en effet pu nous rendre compte que les élèves avaient des difficultés à écrire un protocole détaillé. Les protocoles qu'ils ont réalisés ne sont, pour la plupart, pas réalisables car il manque de nombreuses informations (Girault et al., 2010 ; Marzin et de Vries, 2008). Les élèves ont bien compris qu'un protocole était une suite d'actions mais les actions qu'ils indiquent sont de niveau trop haut et correspondent à des tâches si l'on se réfère à la figure 15. Il manque ainsi des détails, tels que les manipulations exactes à réaliser, le matériel à utiliser, les quantités et les temps, afin de pouvoir réaliser réellement le protocole.

Un autre point qu'il serait intéressant de modifier dans la situation est la justification des choix qu'ils font par rapport à la modification qu'ils veulent réaliser, au matériel biologique qu'ils choisissent, par exemple. Actuellement, il n'est jamais demandé aux élèves de justifier leurs choix d'objet biologique, de mode d'action, de modification en général. Le fait de le leur demander clairement permettrait aux élèves de se poser plus de questions et peut-être de remettre en cause leurs réponses. Nous pourrions inclure des questions et des demandes de justifications dans chaque production. Une autre solution serait d'introduire une quatrième production à réaliser où les élèves justifieraient l'ensemble des choix réalisés lors de la situation et, pourquoi pas leur demander d'indiquer les conséquences de la modification qu'ils souhaitent réaliser, comme cela existait dans la version test de la situation. Cela nous permettrait également, à nous chercheurs, d'identifier plus clairement les connaissances présentes dans leurs productions et nécessaires à notre formalisation des conceptions.

Pour continuer dans les modification utiles à l'analyse des productions, nous pouvons nous intéresser à la première production demandée aux élèves : l'ensemble de leurs idées pour modifier l'information génétique. Tout ce qu'ils écrivent dans cette production est analysé comme si c'était une hypothèse. Mais certaines de leurs réponses ne peuvent être considérées comme des hypothèses. Parfois, certaines réponses n'ont rien à voir avec notre sujet. Si c'est le cas, aucun mot clef n'apparaît alors et elles ne sont pas prises en compte lors de l'analyse. Par contre, d'autres réponses contiennent certains de nos mots clés mais ne sont pas des idées pour répondre au problème et ne devrait pas être considérée comme des hypothèses et être analysées. Dans le cas de l'analyse que nous présentons ici, la distinction n'est pas faite avant l'analyse, entre ce qui peut être considéré comme une hypothèse et ce que ne peut pas l'être parmi l'ensemble de leurs idées. C'est donc un tri effectué *a posteriori*, pendant l'analyse par la présence et l'absence des mots clefs, et item

que nous réalisons. Il serait sans doute plus adapté d'effectuer une sélection avant analyse à partir de critères déterminés *a priori*. Il serait donc intéressant de modifier notre analyse de cette première production des élèves dans ce sens, les productions de ces élèves sortiraient ainsi de l'analyse quantitative.

De même, les résultats seraient différents si toutes les productions n'étaient pas considérées avec le même poids lors de l'analyse comme cela a été effectué. En effet, les trois productions n'ont pas la même importance les unes par rapport aux autres. Par exemple, le graphique et le protocole décrivent, théoriquement, la même expérience mais sur des registres de représentation différents. Ils pourraient alors être analysés avec un poids moins importants, lorsqu'on y retrouve les mêmes informations. Nous pourrions décider que si l'action (verbe d'action + objet biologique) est identique dans le graphique et le protocole, elle n'est prise en compte qu'une seule fois dans les résultats quantitatifs et qualitatifs au lieu de deux fois comme cela a été réalisé dans notre analyse. Ainsi, déterminer, pour améliorer l'analyse, d'attribuer un poids aux différentes productions (par exemple 1 pour le texte, 0,5 pour le graphique et 0,5 pour le protocole) nous conduirait certainement à des résultats légèrement différents.

Une autre piste de modification de notre situation serait de faire réaliser aux élèves de vraies expériences après les avoir élaborées. Bien sur, toutes les expériences ne sont pas réalisables en classe par soucis du matériel à utiliser et d'autres ne respectent pas l'éthique ou la morale comme nous l'avons vu. Une solution pour que les élèves puissent manipuler, après leur réflexion, est de leur proposer, à la fin de l'élaboration, plusieurs protocoles décrivant des expériences réelles et réalisables en classe. Les élèves auraient à choisir celle qui correspond le mieux à l'expérience qu'ils ont élaborée. Ils pourraient ensuite réaliser cette expérience en classe. La réalisation d'une telle expérience induirait un feedback expérimental aux élèves par la manipulation et l'observation des résultats et conséquences des modifications qu'ils ont réalisé. Cela changerait, à notre avis, leurs conceptions et susciterait un apprentissage.

La mise en place de ces modifications, permettrait, à mon avis de rendre notre situation plus efficace et d'obtenir plus de résultats, plus détaillés, notamment pour la détermination des conceptions des élèves. Ces modifications seraient également des pistes si l'on souhaitait susciter un apprentissage lors de cette situation.

II. Réinvestissement et Perspectives

1) cK¢ et d'autres notions

Le modèle cK¢ a été utilisé tout au long de cette situation, depuis son élaboration jusqu'à l'analyse des données. Nous avons pu utiliser ce modèle grâce à une adaptation à notre situation et à la notion biologique choisie. Cette notion est d'ailleurs ciblée et assez simple à modéliser, ce qui n'est pas le cas de toutes les notions de biologie.

Ainsi, si l'on prend l'exemple des échanges mère-fœtus par le biais du placenta, la modélisation des concepts biologiques ne doit pas prendre en compte que les échanges. On doit aussi s'intéresser aux connaissances sur la digestion, la respiration, la circulation, le développement embryonnaire qui sont des notions liées à celle des échanges placentaires car ces systèmes biologiques sont tous interdépendants dans leur fonctionnement et leur

organisation. Mais ce sont aussi des notions qui posent des difficultés indépendamment les unes des autres. Il serait donc utile de considérer les conceptions de chacun des domaines mais aussi celles concernant les interactions des domaines entre eux pour, au final, s'intéresser aux conceptions des échanges placentaires. C'est un système trop compliqué pour pouvoir utiliser cK¢ et surtout formaliser et diagnostiquer le trop grand nombre de conceptions des élèves impliquées, par l'intermédiaire de ce modèle. En effet, avec un tel système de notions, il est très difficile, voir impossible de dégager les opérateurs et contrôles nécessaires à la modélisation et au diagnostic pour chaque notion sans avoir un lien vers une autre notion, qui doit être pris en compte. Il serait possible de réduire le problème à l'un de ces systèmes biologiques (circulatoire, respiratoire…) mais alors nous n'obtiendrions pas les conceptions sur le système que nous souhaitons étudier.

Par contre, si l'on décide de mener une étude sur une notion qui ne présente pas de connaissances « à tiroir », de concepts liés, comme par exemple la liaison antigène - anticorps, le modèle cK¢ est alors facilement utilisable pour la modélisation et le diagnostic.

Nous pouvons donc en conclure qu'un concept modélisable avec cK¢ doit être bien connu scientifiquement et vis à vis de l'enseignement. Le problème doit également être suffisamment précis pour être modélisé, sans faire appel à de multiples notions.

Si l'on décide d'utiliser cK¢ dans d'autres disciplines que la biologie, le problème est le même. Il est nécessaire de s'intéresser à une notion qui ne présente pas une trop grande complexité d'organisation. En fonction de la discipline, on peut alors s'appuyer sur les différentes recherches déjà effectuées en mathématique (Balacheff, 2005 ; Vadcard, 2002), chirurgie (Vadcard, 2005) et physique (Goury, 2008). Dans tous les cas, il faudra prendre en compte les contraintes de la situation développée et de la notion choisie pour appliquer le modèle.

2) Démarche à suivre pour concevoir une situation de diagnostic des conceptions lors de l'élaboration d'une expérience

Afin de partager notre expérience acquise lors de la création, du développement et de l'analyse de la situation que nous avons mise en place, nous proposons des recommandations permettant de créer une telle situation. Cette situation permet le diagnostic de conceptions avec l'aide du modèle cK¢ (Balacheff, 2005).

La première étape consiste à définir la notion sur laquelle nous souhaitons travailler. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une analyse didactique des connaissances en jeu. Une analyse historique ainsi qu'une analyse épistémologique sont à réaliser afin de repérer des obstacles à l'apprentissage de cette notion. A la suite de ces différentes analyses, il est possible de construire une carte conceptuelle pour connaître les liens entre les différentes connaissances impliquées.

Ensuite, il est nécessaire de poser un problème qui sera résolu par une expérience regroupant une ou plusieurs action(s) et dont les réponses possibles, mais pas exclusivement scientifiquement correctes, dépendent de plusieurs domaines de validité. Une analyse didactique de ce problème sera ensuite réalisée afin de dégager les éléments de connaissance à mettre en œuvre pour résoudre le problème.

Après, il est possible d'utiliser le modèle cK¢ pour réaliser la modélisation de la situation et des réponses possibles au problème. Les actions (verbe d'action + objet de connaissances) seront alors modélisées comme des opérateurs (R) et les caractéristiques de ces actions, les connaissances sous-tendant ces actions ainsi que les conséquences des actions deviendront

des contrôles (∑). Les systèmes de représentation (L) seront à définir en fonction des productions et représentations demandées aux élèves. Des quadruplets possibles (P, R, L, Σ) qui sont alors obtenus, représentent autant de conceptions probables pour le problème posé. Cette modélisation sera d'une grande aide lors de l'élaboration de l'outil de diagnostic basé sur ce modèle.

L'étape suivante consiste à créer la situation à proprement parler, celle qui va être expérimentée. La situation est créée dans le cadre de la Théorie des Situations Didactiques par définition, notamment, de son milieu et des variables didactiques. La modélisation est alors utile à ce moment pour déterminer les valeurs de certaines variables et l'étayage à donner aux élèves réalisant la situation. La construction du problème a bien pris en compte le fait que les élèves auront à produire des actions (qui seront identifiées comme des opérateurs). Mais il est également nécessaire de penser à demander des justifications de leurs actions aux élèves pour que l'on puisse ensuite les apparenter aux contrôles (∑) lors de l'analyse. Pour obtenir toutes ces informations, un problème faisant intervenir l'élaboration d'une expérience présente des avantages comme nous l'avons vu. Elaborer une expérience nécessite de mettre en œuvre des actions et de justifier les choix réalisés quant au matériel et aux processus choisis. Cela permet donc la mobilisation des connaissances de l'élève. Leur formalisation dans les différentes étapes de l'élaboration de l'expérience permet l'utilisation du modèle lors de l'analyse.

Pour mener à bien cette analyse, des grilles d'analyses doivent être construites. Pour cela, il est utile de prendre en compte la modélisation *a priori* réalisée afin de retrouver dans ces grilles les actions (verbe d'action + objet de connaissance) et les justifications que produiront les élèves.

Une fois la situation mise en place et expérimentée, l'analyse se fait par l'intermédiaire des grilles d'analyse construites. Le diagnostic de conception est réalisé par le réinvestissement du modèle en lien avec le problème et la notion étudiée et la création de l'outil de diagnostic où les conceptions sont composées d'actions et de connaissances sur différents registres de représentation.

Cette démarche de création et d'analyse d'une situation de diagnostic des conceptions avec le modèle cK¢ lors de l'élaboration d'un expérience pourra être testé lors de recherches ultérieures avec d'autres concepts.

3)Vers un diagnostic automatique

Lors de notre analyse, nous avons utilisé manuellement mais de façon systématique les grilles d'analyse construites avec cK¢, en essayant de ne pas mettre de dimension subjective à l'analyse mais seulement en déterminant si un terme (ou un de ses synonymes) ou un dessin était présent. Cette façon de procéder pourrait être implémentée dans le logiciel LabBook sous forme d'un tuteur.

La mise en place d'un tel diagnostic automatique permettrait des évolutions du logiciel LabBook telles que la possibilité d'orienter l'élève vers le protocole correspondant au niveau de l'idée développée dans le graphique et issue du texte des idées. Cette orientation automatique serait ainsi plus objective que celle effectuée par le chercheur, comme nous l'avons déjà vu lors de la critique de notre situation.

L'implémentation d'un diagnostic automatique permettrait aussi d'obtenir les conceptions des élèves à partir de l'ensemble de leurs productions. Ainsi le diagnostic s'appuie sur une analyse préalable des conceptions. Il met ensuite en relation des productions d'élèves et une typologie réalisée *a priori*.

Mais la mise en place et l'utilisation du diagnostic automatique de l'ordinateur créerait d'autres erreurs qu'il serait nécessaire de prendre en compte. L'implémentation d'un tel diagnostic dans le logiciel LabBook pourrait alors être le sujet de recherches futures, dans le but d'apporter de réelles rétroactions aux élèves.

4) Adaptation de la situation aux nouveaux programmes

Les élèves auprès desquels nous avons réalisé notre diagnostic de conceptions ont suivi des programmes qui ont été réformés depuis. Aujourd'hui, le programme de troisième comporte une différence importante en lien avec notre sujet. Une connaissance a été modifiée : « Les chromosomes présents dans le noyau sont le support de l'information génétique. » (auparavant « contiennent de l'information génétique. »). Cette connaissance est également associée à une activité ressemblant à celle proposée pour réaliser notre diagnostic : « Formuler des hypothèses quant à la localisation de l'information génétique. Valider ou invalider ces hypothèses à partir de résultats d'expérience. » (BO, 2010).

La présence de cette activité en classe de troisième nécessiterait de faire le diagnostic de conceptions avec des élèves de début de première ayant suivi ce programme. Cela ne changerait pas, à mon avis, nos résultats quant aux verbes d'action utilisés pour modifier l'information génétique puisque cette activité ne concerne pas la modification. Mais elle aurait sûrement des incidences sur les niveaux biologiques cités et les objets biologiques, car les élèves auraient déjà eu à se poser cette question et à réfléchir dessus. Ce serait, je pense, les niveaux Gène et ADN (nouvellement introduits dans le programme de troisième) qui seraient les plus cités (peut être exclusivement) ainsi que leurs objets biologiques. Une étude supplémentaire serait à réaliser pour le vérifier.

5) Développement d'une mission SCY

Le projet européen SCY dans lequel l'équipe MeTAH est impliqué, propose des « missions » sur des sujets d'actualité et à réaliser à l'aide de la plateforme informatique SCY spécialement créée. Une des missions, dont le développement est à la charge de notre équipe, portera sur l'identification d'un individu à partir d'une analyse ADN, dans le cadre d'une enquête policière.

Les conceptions identifiées dans mon travail vont être un des éléments pris en compte lors de la construction de cette mission. Il sera ainsi possible d'anticiper les difficultés des élèves quant à la localisation, l'organisation et la structure de l'information génétique.

6) Aider les élèves à dépasser leurs difficultés

Notre recherche nous a permis de confirmer que les élèves ont des difficultés avec la notion d'information génétique. Nous avons également mis en évidence des obstacles qui les empêchent de comprendre cette notion.

Afin de les aider à construire des connaissances biologiquement correctes et à être capable de les réinvestir, nous proposons plusieurs remédiations qu'il serait utile de mettre en place.

Afin d'aider les élèves à dépasser leurs obstacles, notamment ceux concernant le fait de placer l'information génétique aux niveaux Cellule et Noyau, il est possible de mettre en place de nouvelles situations de TP.

Ces situations, où leurs conceptions ne seraient pas opérationnelles, permettraient aux élèves de modifier leur point de vue. Ainsi, réaliser des TP, avec ou sans matériel biologique vivant (en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en faire et respectant les règles d'éthique) procurerait un feedback expérimental aux élèves et les aiderait à opérer une évolution conceptuelle.

Un deuxième moyen d'aider les élèves à comprendre l'organisation biologique générale serait de proposer un enseignement plus global où tous les éléments biologiques soient mieux articulés. L'idéal serait de faire participer les élèves à la découverte de cette organisation en leur demandant par exemple de faire des maquettes fonctionnant comme des poupées russes. Il serait possible de s'appuyer sur l'exemple des Néerlandais. En effet, la réalisation de maquettes, par exemple, est très utilisée aux Pays-Bas dans de nombreuses disciplines afin d'aider les élèves à prendre consciences des relations entre les objets. Dans notre cas, cela permettrait aux élèves de comprendre que les niveaux sont emboîtés les uns dans les autres et qu'ils dépendent les uns des autres. Afin de bien faire comprendre cet assemblage, il est indispensable que les emboîtements soient respectés entre les différents matériels présentés. Ce n'est pas toujours le cas actuellement, notamment dans les manuels, et c'est une source potentielle de confusion pour les élèves.

En reprenant notre problème, « Comment modifier l'information génétique ? », nous pourrions également aider les élèves à dépasser leurs difficultés en nous centrant sur :

- sur la structure biologique utilisée,
- sur ses relations avec les autres structures biologiques,
- sur le type d'action envisagée et
- sur les associations entre structure(s) et action.

L'aide à fournir serait alors centrée sur ces quatre points. Il faudrait préalablement identifier les combinaisons « incohérentes » à partir des productions que nous avons obtenues et anticiper sur l'interprétation de ces associations à la lueur des obstacles connus. Par exemple pour un élève où l'on identifie un lien non « naturel » et direct entre le niveau cellule et le niveau individu on pourrait lui demander de retrouver les niveaux intermédiaires. De façon plus générale, si l'on met en évidence des connaissances développées par les élèves et proposant des associations entre des niveaux biologiques non directement emboîtés on pourrait les aider à retrouver les niveaux d'emboitement. L'ensemble de ses aides consisterait à rendre plus concret, pour les élèves, des notions abstraites.

Si l'on s'inspire des travaux de didactique réalisés dans le domaine de la génétique, nous pouvons aussi présenter d'autres remédiations. Par exemple, nous pouvons proposer aux élèves une situation présentant la manipulation d'une pelote de laine et l'utiliser comme une analogie aux gènes et à l'ADN. C'est une situation que Venville et Donovan (2008) ont expérimentée et qui a porté ses fruits.

> « The model was malleable and had multiple roles in learning for the pupils in the different years that reflected their developing conceptual understanding about genes and DNA. (…) Finally, for the Year 12 pupils, the model initiated and consolidated networks of understanding related to genetics concepts and preceded further network creation to protein synthesis and characteristics. » [Le modèle est malléable et a de multiples rôles dans l'apprentissage pour les élèves de différentes années et qui reflète le développement conceptuel de leur compréhension sur les gènes et l'ADN. (…)

> Finalement, pour les élèves de douzième année, le modèle initie et consolide leur réseau de compréhension lié aux concepts génétiques et précède la création d'u réseau sur la synthèse des protéines et leurs caractéristiques.] (Venville, Donovan, 2008).

Une autre proposition de remédiation possible est l'utilisation, au cours d'un enseignement, du logiciel BioLogica comme l'ont fait Tsui et Treagust (2007) avec des élèves australiens. C'est un logiciel qui permet de visualiser les relations entre les niveaux biologiques lors de croisements. Les niveaux étant reliés, les élèves utilisant ce logiciel peuvent également observer les effets d'une modification à un niveau sur les autres niveaux.

> « BioLogica allows students to manipulate objects of genetics represented at different levels of biological organization – DNA, genes, chromosomes, gametes, cells, organisms, and pedigrees – and observe their behaviour constrained by the Mendelian model of genetics and molecular/cellular mechanism. All representation levels are linked so that changes in one level are reflected in all the other levels. »
> [BioLogica permet aux élèves de manipuler des objets génétiques qui sont représentés à différents niveaux de l'organisation biologique – ADN, gènes, chromosomes, gamètes, cellules, organismes, et pédigrées – et d'observer leur comportement contraint par le modèle génétique Mendélien et les mécanismes moléculaires et cellulaires. Toutes les représentations de niveaux sont liées donc les changements à un niveau sont réfléchis sur tous les autres niveaux.] (Tsui et Treagust, 2007).

L'utilisation d'un tel logiciel avec des élèves français permettrait de leur faire comprendre l'organisation biologique, l'articulation de différents niveaux et de mettre en avant le fait que la manipulation d'un niveau entraine des conséquences sur tous les autres, ce que les élèves ont actuellement du mal à comprendre.

D'autres remédiations, comme celle présentée par Duncan et Reiser (2007) seraient possibles. Ils proposent aux élèves de réexpliquer, avec leurs propres mots, un texte sur une maladie causée par une mutation. Ensuite, ils leur posent des questions sur cette maladie, ses conséquences, ses modes de transmission. Ainsi, ils obtiennent, par le discours, une mobilisation des connaissances des élèves sur la transmission des caractères, l'influence des maladies génétiques sur les organismes ainsi que sur leurs descendances. Ces auteurs peuvent aussi découvrir les conceptions des élèves sur la localisation de l'information génétique, son support et son rôle dans l'organisme.

Dans d'autres études, Morimoto (2002) et Zion (2006), présentent des séances de travaux pratiques montrant l'influence des UV sur les mutations et le rôle des systèmes de réparation de l'ADN.

L'idée principale de l'ensemble de ces aides, suggérées de notre part ou déjà expérimentées pour celles provenant des articles que nous avons lus, est de faire raisonner les élèves aux différentes échelles du vivant. Cela les aiderait à comprendre l'articulation, la place et le rôle de ces différents niveaux biologiques.

Chapitre VIII : Conclusion

Notre objectif de recherche était la modélisation et le diagnostic de conceptions.

La situation que nous avons construite nous a permis de réaliser le diagnostic des conceptions des élèves sur la modification de l'information génétique après les avoir modélisées avec cK¢. Ce modèle a été utilisé tout au long de la thèse pour l'élaboration de la situation, la construction des grilles d'analyse, l'analyse des productions et la modélisation des conceptions dégagées. Il nous a également permis d'adapter notre situation à l'informatique en proposant une formalisation, indispensable à l'utilisation du logiciel LabBook. Cette formalisation pourrait être réutilisée et complétée afin de développer le volet diagnostic automatique de LabBook. Ce logiciel deviendrait alors un EIAH proposant des rétroactions aux élèves qui l'utilisent.

Nous avons mené à bien notre recherche et avons ainsi pu compléter les découvertes faites dans les autres recherches du domaine en précisant les difficultés des élèves sur les niveaux biologiques et en diagnostiquant leurs conceptions. Ces difficultés concernent aussi des confusions de termes et surtout des problèmes d'échelle et de niveau biologique pour localiser les différents objets biologiques intervenant lors de la modification de l'information génétique.

Il serait possible d'aider les élèves à dépasser leurs difficultés, notamment en introduisant certains TP à l'occasion des enseignements sur l'information génétique et ses modifications. De plus, il serait indispensable d'enseigner l'organisation biologique générale afin que les élèves prennent conscience de l'articulation des différents objets biologiques ayant un rôle en génétique.

Bibliographie

Albaladejo, C. (1988). Pupils' meaning for 'mutation'. *Journal of Biological Education*, vol.22 (3), 215-219.

Astolfi, J.P., Perterfalvi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster n°16*, 103-141. Paris, INRP.

Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.

Bahar, M., Johnstone, A.H., Hansell, M.H. (1999). Revisiting learning difficulties in biology. *Journal of Biological Education*, vol.33 (2), 84-86.

Balacheff, N. (1995). Conception, connaissance et concept. In: Grenier D. (ed.) *Didactique et technologies cognitives en mathématiques*, séminaires 1994-1995, 219-244. Grenoble : Université Joseph Fourier.

Balacheff, N., Margolinas, C. (2005). cK¢ Modèle de connaissances pour le calcul de situations didactiques. *Balises pour la didactique des mathématiques*, Ed. La Pensée Sauvage, Grenoble, 1-32.

Bessot, A. (2003). Une introduction à la théorie des situations didactiques. *Les cahiers du laboratoire Leibniz*, vol.91.

Brousseau, G. (1982). Les objets de la didactique des mathématiques. *Actes de la troisième école d'été de didactique des mathématiques*, Olivet.

Brousseau, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol.4 (2), 165-198.

Brousseau, G. (1986). Fondations et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol.7 (2), 33-115.

Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Ed. La Pensée Sauvage, Grenoble.

Brousseau, G. (2002). *Glossaire de la Théorie des Situations Didactiques*. En ligne : http://daest.pagesperso-orange.fr/Pages%20perso/Brousseau.htm

Brown, A. (1992). Design experiments: theoretical and methodological challenges in creating complex interventions. *The journal of the Learning sciences*, vol.2 (2), 141-178.

Campbell, N. A., Reece, J. B. (2004). *Biologie*. Adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu, Ed. De Boeck, 2ème édition.

Chapel, G., Marzin, P., Monod-Ansaldi, R., Devallois, D. (2007). Conceptions de protocoles expérimentaux pour aider les élèves à faire le lien entre : expérience, modèle et actualités immunologiques sur le SIDA. *Actes des XXVIIIème JIES*.

Chapel, G., Marzin, P. (2009). Étude des connaissances d'élèves de seconde sur les mutations génétiques. *Actes des 6èmes journées de l'ARDIST*.

Clark, R. E., Feldon, D., Van Merrienboer, J. J. G., Yates, K., Early, S. (2006). Cognitive task analysis. In J. M. Spector, M. D. Merrill, J. J. G. van Merrienboer, & M. P. Driscoll (Eds.) *Handbook of research on educational communications and technology* (3rd ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Clément, P. (2004). Science et idéologie : exemples en didactique et épistémologie de la biologie. *Actes du colloque Sciences, Médias et Société de l'ENS Lyon*, 53-69.

Dahm, R. (2008). La première découverte de l'ADN. *Pour la science*, vol.371, 24-28.

Dahmani, H. R. (2009). *Etude des spécificités iconiques et fonctionnelles des images scientifiques (représentations figuratives et graphiques) et de leurs utilisations didactiques pour l'amélioration des apprentissages en biologie au secondaire et à l'université : cas des molécules*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux II.

Darot, E. (1991). Respirer, digérer : assimilent-ils ? *Aster n°13*. Paris, INRP.

d'Ham, C. (2009). La construction de protocole expérimental : objet et moyen d'apprentissage. *Les cahiers pédagogiques, dossier « Faire des sciences physiques et chimiques », vol.469.*

de Jong, T., Ainsworth, S., Dobson, M., van der Hulst, A., Levonen, J., Reimann, P., et al. (1998). Acquiring knowledge in science and mathematics: The use of multiple representations in technology-based learning environments. In M.W. van Someren, P. Reimann, H.P.A. Boshuizen, & T. de Jong (Eds.), *Learning with multiple representations*, 9-40. London: Elsevier.

de Vries, E. (2006). *Représentation et technologie en éducation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre Mendès France, Grenoble II.

Duncan, R. G., Reiser, B. J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: students' understandings of molecular genetics, *Journal of Research in Science Teaching*, vol.44 (7), 938-959.

Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine.* Bern, Switzerland: Peter Lang.

Fabre, M., Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissement d'obstacles. *Aster n°24*, 37-57. Paris, INRP.

Fayolle, H. (2009). *Analyse des obstacles liés à la construction du concept d'ADN.* Mémoire de Master 2 Recherche, Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Fisher, K.M. (1983). Amino acids and translation: A misconception in biology. *Proceedings of the international seminar 'Misconceptions in science and mathematics'*, eds. Helm H and Novak J D, 407-419. Ithaca, USA: Cornell University.

Fuchs-Gallezot, M., Coquidé, M. (2007). Genèse de savoirs à enseigner : une étude de cas historique portant sur la matérialité de l'air (1882-2006). *Actes des 5èmes journées de l'ARDIST*.

Giordan, A. (1992). Le modèle d'apprentissage allostérique ou comment utiliser les conceptions des apprenants dans des situations d'élaboration de savoir ? Genève, *document en ligne* : http://www.andregiordan.com/biblio.html

Girault, I., d'Ham, C., Ney, M., Sanchez, E., Wajeman, C., (sous presse, 2011) Characterizing the 'experimental procedure' in science laboratories: a preliminary step toward student design experiment. *International Journal of Science Education*.

Gooding, D. (1992). What is expérimental about thought experiements? *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, vol.2, 280-290.

Goury, S. (2008). *Analyse des conceptions d'étudiants de première année universitaire sur le traitement et l'interprétation de la mesure en physique*. Mémoire de Master 2 Professionnel, Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Grandbastien, M., Labat, J.M. (2006). Introduction. *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain*, 97-115. Direction : Grandbastien M. et Labat J.M.. Ed. Lavoisier.

Hewson, P., & Lemberger, J. (2000). Status as the hallmark of conceptual learning. In R. Millar, J. Leach, & J. Osborne (Eds.), *Improving science education: The contribution of research*, 110 – 125. Buckingham, UK: Open University Press.

Hibou, M., Py, D. (2006). Représentation des connaissances de l'apprenant. *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain*, 97-115. Direction : Grandbastien M. et Labat J.M.. Ed. Lavoisier.

Hidi, S. (1990). Interest and its contribution as a mental resource for learning. *Review of Educational Research*, vol.60, 549 – 571.

Johnstone, A.H., Mahmoud, N.A. (1980). Isolating topics of high perceived difficulty in school biology. *Journal of Biological Education*, vol.14 (2), 163-166.

Khattech, S., Orange, C. (2005). Le gène : conception d'élèves du lycée et d'étudiants Tunisiens et connaissances scientifiques actuelles. *Actes des 4èmes journées de l'ARDIST*.

Khattech, S., Abbes, S., Orange, C. (2007). Argumentation du refus de deux modèles d'ADN : Conceptions et rapport au savoir d'élèves et d'étudiants tunisiens. *Actes des 5èmes journées de l'ARDIST*.

Knippels, M.C., Waarlo, A.J., Boersma, K.T. (2005). Design criteria for learning and teaching genetics. *Journal of Biological Education*, vol.39 (3), 108-112.

Legay, J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Versailles : INRA éditions.

Lewis, J, Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance – do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, vol.22 (2), 177- 195.

Luengo, V., Vadcard, L., Balacheff, N. (2006). Les EIAH à la lumière de la didactique. *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain*, 47-68. Direction : Grandbastien, M. et Labat, J.M.. Ed. Lavoisier.

Maisch, C., Ney, M., Balacheff, N. (2009). Quelle est l'influence du contexte sur les raisonnements d'étudiants sur la mesure en physique ? *Aster n° 47*, 43-70. Paris, INRP.

Maisch, C. (2010). *Etude des raisonnements d'étudiants sur la mesure en TP de physique de première année universitaire : Influence du contexte et Effet de rétroaction*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

Marbach-Ad, G. (2001). Attempting to break the code in student comprehension of genetic concepts. *Journal of Biological Education*, vol.35, 183-189.

Marbach-Ad, G., Stavy, R. (2000). Students' cellular and molecular explanations of genetic phenomena. *Journal of Biological Education*, vol.34 (4), 200-205.

Marty, B. (2003). *Le premier âge de l'ADN*. Paris, Vuibert.

Marzin, P., Girault, I., Wajeman, C., d'Ham, C., Sanchez, E., Cross, D. (2007). L'utilisation d'un arbre des tâches pour concevoir et analyser des situations d'apprentissage : trois TP intégrant la conception d'un protocole expérimental par les élèves, en géologie, chimie et physique. *Actes des 5èmes journées de l'ARDIST*.

Marzin, P., de Vries, E. (2008). How can we take into account student conceptions of the facial angle in a palaeontology laboratory work? *Proceedings of ICLS conference*.

Millar, R. (2004). The role of practical work in the teaching and learning of science. High school science laboratories: role and vision. *National academy of sciences, Washington DC*.

Ministère de l'éducation nationale, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (2008). *Rapport du Jury de CAPES Externe de Sciences de la Vie et de la Terre.*

Mondot, J.-F., Bettayeb, K., Demarthon, F., Chambon, P., Perrier, J.-J. (2003). Repères : Spécial ADN, Ce que 50 ans de découvertes ont changé. *Science et Vie*, mars 2003, 109-142.

Morange, M. (1994). *Histoire de la biologie moléculaire*. Paris, La Découverte.

Morimoto, K. (2002). Demonstrating the influence of UV rays on living things. *Journal of Biological Education*, vol.37 (2), 39-43.

Ney, M. (2007). *Modélisation formelle en sciences expérimentales : problématiques de la transmission.* Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard, Lyon I.

Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie : quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : PUF.

Pekdag, B., Le Maréchal, J.-F. (2003). Changement conceptuel et hyperfilm : cas de l'apprentissage des acides et des bases en classe de Première S. *Actes des 3èmes journées de l'ARDIST*.

Pfriedrichsen, P., Stone, B., Brown, P. (2004). Examining Students' Conceptions of Molecular Genetics in an Introductory Biology Course for Non-Science Majors: A Self Study. Proceedings of *NARST*.

Pintrich, P.R. (1989). The dynamic interplay of student motivation and cognition in the college classroom. *Advances in motivation and achievement: Motivation enhancing environments*, vol.6, 117-160, C.Ames & M.Maher (Eds.). Greenwich, CT: JAI Press.

Pintrich, P. R., & Garcia, T. (1991). Student goal orientation and self-regulation in the college classroom. *Advances in motivation and achievement*, Vol. 7, 371-402, M. L. Maehr & P. R. Pintrich (Eds.). Greenwich CT: JAI Press.

Popper, K. R. (1959). *La logique de la découverte scientifique*. Paris, Traduction Payot, 1973.

Prain, V., Hand, B., Hohenshell, L.M. (2001). Ecrire pour apprendre les sciences au lycée : stratégies d'écriture d'élèves. *Aster n°33*, 49-79. Paris, INRP.

Rotbain, Y., Marbach-Ad, G., Stavy, R. (2005). Understanding molecular genetic through a drawing-based activity. *Journal of Biological Education*, vol.39 (4), 174-178.

Rumelhard, G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne, Peter Lang.

Séré, M.-G., Beney, M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique. *Didaskalia,* vol.11, 75-102.

Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J.-F., Buty, C. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several european countries. *Science Education,* vol.22 (19), 483-508.

Thorley, N.R. (1990). *The role of the conceptual change model in the interpretation of classroom interactions*. Unpublished doctoral dissertation, University of Wisconsin – Madison, Wisconsin, WI.

Triquet, E. (2001). Ecrire et réécrire des textes explicatifs à partir d'une visite au muséum. *Aster n°33*, 227-253. Paris, INRP.

Tsui, C.-Y., Treagust, D. (2007). Understanding genetics: analysis of secondary students' conceptual status. *Journal of Research in Science Teaching*, vol.44 (2), 205-235.

Vadcard, L. (2002). Caractérisation de quelques conceptions de l'angle chez des élèves de seconde. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol.22 (1), 77-120.

Vadcard, L., Luengo, V. (2005). Interdisciplinary approach for the design of a learning environment. *Proceedings of E-Learn Conference*, Vancouver.

Venville, G., Treagust, D. (1998). Exploring conceptual change in genetics using a multidimensional interpretive framework. *Journal of Research in Science Teaching*, vol.35 (9), 1031-1055.

Venville, G., Donovan, J. (2007). Developing year two students' theory of biology with concepts of gene and DNA. *International Journal of Science Education*, vol.29 (9), 1111-1131.

Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol.10 (23), 133-170.

Vignais, P. (2001). *La biologie des origines à nos jours*. Paris, EDP sciences.

Wajeman, C. (2009). Experimental procedure design activities: how to build the labwork and what is the knowledge mobilised by the students? Proceedings of *ESERA conference*, 2009.

White, R. (1996). The link between the laboratory and the learning. *International journal of science education*, vol.18 (7), 761-774.

Wood-Robinson, C., Lewis, J. and Leach, J. (2000). Young people's understanding of the nature of genetic information in the cells of an organism. *Journal of Biological Education*, vol.35 (1), 29–36.

Zion, M., Guy, D., Yarom, R., Slesak, M. (2006). UV radiation damage and bacterial DNA repair systems. *Journal of Biological Education*, vol.41 (1), 30-33.

Table des illustrations

Figure 1 : Différentes représentations graphiques de l'ADN 12
Figure 2 : Un écosystème, ensemble de milieux 31
Figure 3 : Plusieurs individus 32
Figure 4 : Plusieurs organes de l'appareil digestif 33
Figure 5 : Une cellule procaryote et une cellule eucaryote 34
Figure 6 : Un noyau 35
Figure 7 : Un caryotype humain 35
Figure 8 : Un chromosome en X 36
Figure 9: Un gène avec promoteur, corps et terminaison 37
Figure 10 : Molécule d'ADN 38
Figure 11 : Tableau du code génétique 39
Figure 12 : Organisation biologique générale 39
Figure 13 : Différents types de mutations 41
Figure 14 : Schéma des interactions sujet - milieu 59
Figure 15 : Schéma général d'un protocole sous forme d'arbre des tâches 74
Figure 16 : Plateforme LabBook avant connexion 75
Figure 17 : Feuille de consignes 84
Figure 18 : Feuille d'aide à la navigation 85
Figure 19 : Choix des verbes d'actions et du matériel biologique 91
Figure 20 : Copie d'écran de l'éditeur COPEX au niveau Cellule (C) avec le détail d'un objet biologique : la membrane 1 92
Figure 21 : Enoncé de la première étape de l'expérimentation 97
Figure 22 : Résolution possible du problème au niveau Noyau 101
Figure 23 : Résolution possible au niveau Noyau, adaptée au niveau seconde 102
Figure 24 : Partie Idées de l'élève 34 (test) 118
Figure 25 : Partie Graphique de l'élève 34 (test) 119
Figure 26 : Partie Protocole de l'élève 34 (test) 121
Figure 27 : Partie Idée de l'élève 15 124
Figure 28 : Graphique de l'élève 15 125
Figure 29 : Protocole de l'élève 15 127
Figure 30 : Nombre de productions par élève 131
Figure 31 : Citation des niveaux pour chaque filière 132
Figure 32 : Niveau le plus cité pour l'ensemble des élèves 134
Figure 33 : Utilisation des quatre verbes. 135
Figure 34 : Utilisation des objets biologiques par niveau 136
Figure 35 : Ensemble des productions sur un même niveau. 137
Figure 36 : Cohérence entre le niveau le plus bas du Texte et celui développé dans le Graphique et le Protocole 138
Figure 37 : Exemples d'éléments de la Conception 1 - Échange de cellules (Élève 26) 140
Figure 38 : Exemples d'éléments de la Conception 2 : Échange de noyaux (Élève 61) 142
Figure 39 : Exemples de la Conception 3 : Échange chromosomique (Élève 60) 143
Figure 40 : Exemple d'éléments de la Conception 4 : Section d'un chromosome (Élève 65) 144
Figure 41 : Exemple d'éléments de la Conception 5 : Échange de gènes (Élèves 51 et 14) 146
Figure 42 : Exemple d'éléments de la Conception 6 : Échange de parties de gènes (Élève 52) 147
Figure 43 : Exemple d'éléments de la Conception 7 : Échange d'ADN (Élève 62) 148
Figure 44 : Exemples d'éléments de la Conception 8 : Substitution de bases 150
Figure 45: Exemple d'éléments de la Conception 9 : Appariement des bases (Élève 7) 152
Figure 46 : Productions de l'élève 2 154

Table des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des programmes de troisième de 1998 et 2008 ..... *28*
Tableau 2 : Comparaison des programmes de seconde de 1999 et 2010 ..... *30*
Tableau 3 : Correspondance entre les lettres et le niveau biologique des protocoles *83*
Tableau 4 : Récapitulatif des variables avec les choix possibles, et ceux réalisés. *89*
Tableau 5 : cK¢ appliqué au niveau ADN *109*
Tableau 6 : Organisation pédagogique de la situation finale *112*
Tableau 7 : Organisation pédagogique de la deuxième étape de l'expérimentation : la situation test *113*
Tableau 8 : Grille d'analyse pour la partie idées du niveau Gène *114*
Tableau 9 : Signification des codes pour la partie Idée au niveau Gène *115*
Tableau 10 : Codes pour l'analyse du graphique du niveau 7, Chromosome *116*
Tableau 11 : Codes pour l'analyse du protocole au niveau 3, Organe *117*
Tableau 12 : Grilles d'analyse de la partie Idées de l'élève 34 (test) *119*
Tableau 13 : Grilles d'analyse de la partie Graphique de l'élève 34 (test) *120*
Tableau 14 : Grilles d'analyse de la partie Protocole de l'élève 34 (test) *121*
Tableau 15 : Récapitulatif de l'analyse des productions de l'élève 34 ..... *122*
Tableau 16 : Code des items pour le niveau Noyau *124*
Tableau 17 : Grilles d'analyse de la partie Idées de l'élève 15 ..... *125*
Tableau 18 : Grilles d'analyse de la partie Graphique de l'élève 15 ..... *126*
Tableau 19 : Grilles d'analyse de la partie Protocole de l'élève 15 ..... *127*
Tableau 20 : Récapitulatif de l'analyse d'une action d'un élève *128*
Tableau 21 : Conception 1 : Échange de cellules *140*
Tableau 22 : Conception 2 : Échange de noyaux *141*
Tableau 23 : Conception 3 : Échange chromosomique *143*
Tableau 24 : Conception 4 : Séparation d'un chromosome *144*
Tableau 25 : Conception 5 : Échange de gènes *145*
Tableau 26 : Conception 6 : Échange de parties de gènes *147*
Tableau 27 : Conception 7 : Échange d'ADN *148*
Tableau 28 : Conception 8 : Substitution de bases *149*
Tableau 29 : Conception 9 : Appariement des bases *151*
Tableau 30 : outil de diagnostic et de formalisation appliqué sur les productions de l'élève 2 ..... *155*
Tableau 31 : Nombre d'élèves par conception *155*

Annexes

Annexe I : Fiche méthodologique pour orienter les élèves vers un protocole

Méthode pour choisir le protocole à indiquer à l'élève à partir de son texte et son dessin

Lisez le texte et notez l'ensemble des niveaux correspondant à leurs idées.

Regardez ensuite le dessin, il doit correspondre à une des idées du texte qu'ils ont choisi et qu'ils vont développer sur les trois dernières productions.

Si sur le dessin, vous voyez apparaître plusieurs protocoles possibles, demandez-leur à quelle idée exprimée dans le premier texte, cela se rapporte-t-il et laquelle ils choisissent alors.

Vous devriez alors avoir tous les renseignements nécessaires pour déterminer le protocole correspondant à leur conception.

- Dessin : Un animal avec des rayons qui arrivent sur lui, une comparaison avant/après d'un animal + Texte : Modification des facteurs environnementaux → **Protocole Milieu - Organisme = A.**
- Dessin : Un organe avant/après + Texte : Modification d'un organe → **Protocole Organe = B.**
- Dessin : Deux cercles représentant une cellule avec son noyau avant/après + Texte : Modification de la cellule ou d'un constituant de la cellule → **Protocole Cellule = C.**
- Dessin : Deux cercle représentant une cellule avec son noyau ou un noyau seul puis une cellule sans noyau ou une modification du noyau + Texte : Modification du noyau → **Protocole Noyau = D.**
- Dessin : 23 paires de chromosomes puis 22 paires +1 chromosomes (ou 22 paires +3) + Texte : Modification du caryotype → **Protocole Caryotype = E.**
- Dessin : Une ou plusieurs croix ou trait(s) représentant un ou des chromosome(s) dans un cercle ou non puis une modification (changement de couleur, de nombre...) ou disparition de ce chromosome + Texte : Modification du chromosome → **Protocole Chromosome = F.**
- Dessin : Un trait représentant un gène ou une marque sur un chromosome puis une modification (changement de longueur, changement de couleur) + Texte : Modification d'un gène→ **Protocole Gène = G.**
- Dessin : Une double hélice avec des traits indiquant les nucléotides puis une modification au niveau des nucléotides + Texte : Modification de l'ADN → **Protocole ADN = H.**

Si même après cette classification, vous n'arrivez pas à vous décider, appelez moi et c'est moi qui trancherai pour le choix de protocole.

Annexe II : Étape 1 de l'expérimentation

Méthodologie d'analyse des résultats

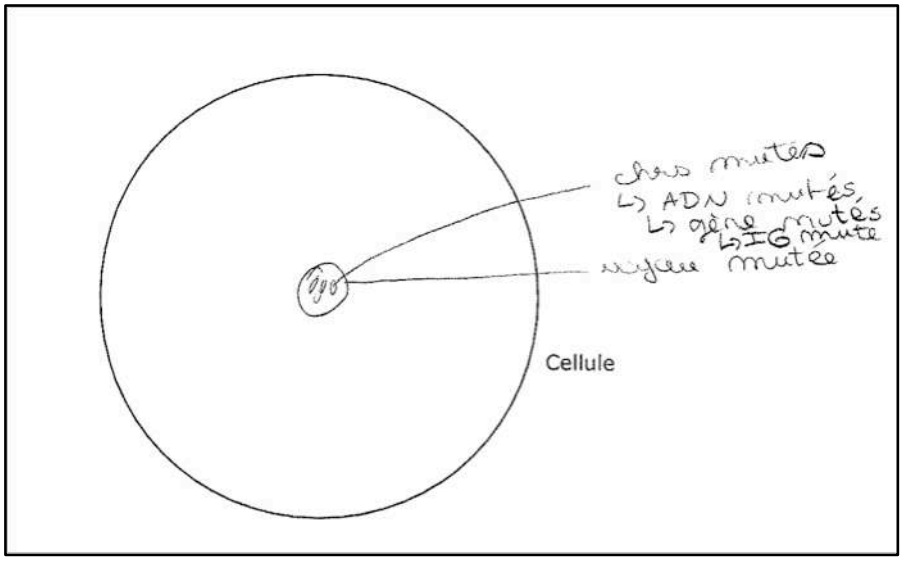
Pour chaque catégorie, plusieurs réponses sont acceptées. Par exemple, les trois réponses suivantes sont classées dans la catégorie Cellule : « une mutation au niveau de la membrane de la cellule » (Yohann, Groupe A), « un rayonnement agit (…) à l'intérieur de la cellule » (Laura, Groupe B), « Le rayonnement agit dans le centre de la cellule » (Paloma, Groupe C).

Certaines des justifications des élèves sont simples à classer : « Les rayonnements agissent sur l'essence même de la cellule : ils modifient les gènes de la cellule. » (Élève Y, Groupe C). Cette réponse est classée dans le niveau Gène. Mais d'autres font appel à plusieurs niveaux.

Pour ces réponses sur plusieurs niveaux, nous avons donc adopté une méthode de distinction supplémentaire. Si les niveaux sont organisés dans la réponse, avec une notion d'implication, d'ordre, alors c'est le plus petit niveau qui prévaut : « Les rayons mutagènes provoquent des mutations dans le noyau donc sur les chromosomes donc l'information génétique et le message sont mutés. » (Élève X, Groupe B). Dans cette réponse, nous avons interprété les termes « information génétique » et « message » comme étant au niveau ADN. Nous retrouvons alors plusieurs niveaux : Noyau, Chromosomes et ADN, mais le niveau considéré pour cette réponse est ADN, car on retrouve un ordre parmi les différents niveaux cités.

Par contre, pour un élève qui écrit : « Les rayons agissent dans le noyau et les organites » (Benjamin, Groupe B), sa réponse est non organisée, et classée dans deux catégories : Noyau et Autre (aucune catégories n'ayant été défini pour le niveaux des organites cellulaires).

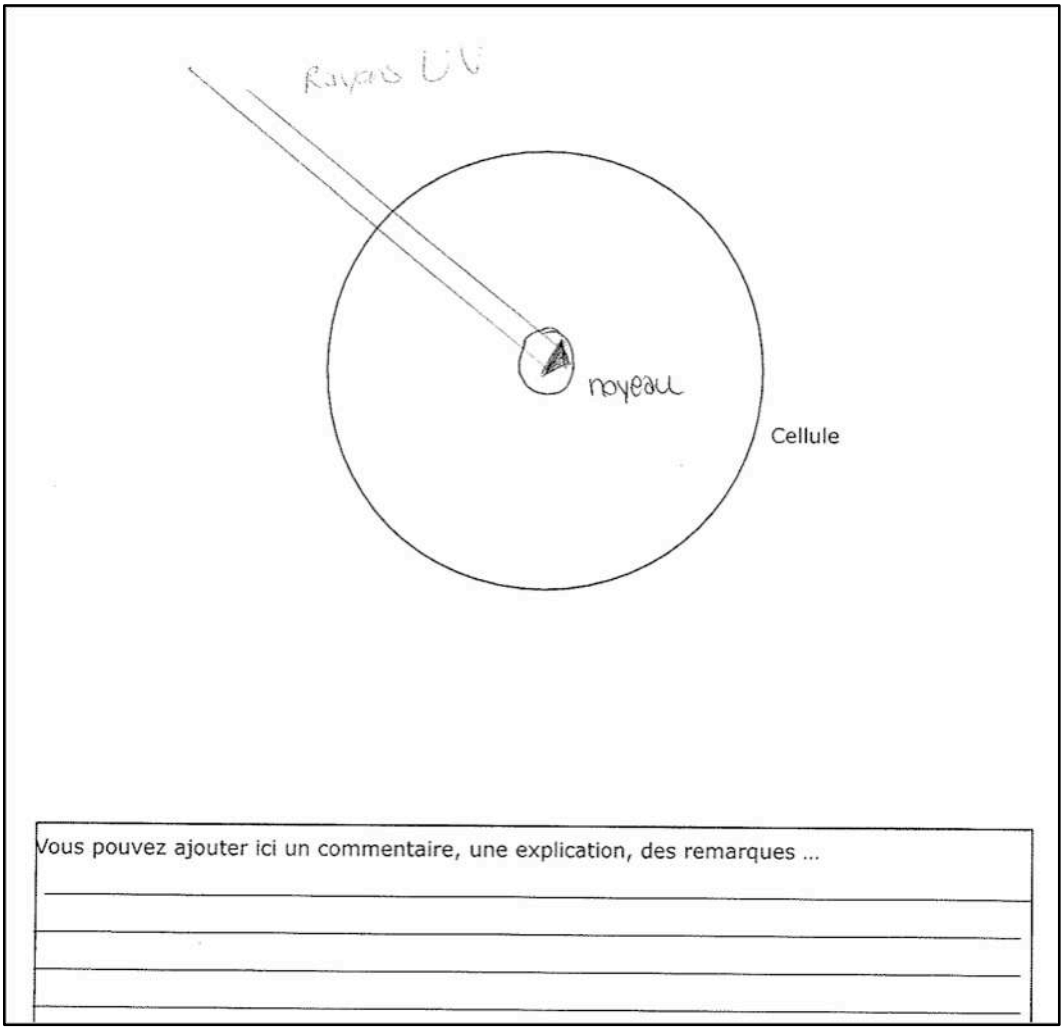
Comme indiqué ci-dessus, nous prenons en compte le dessin après avoir analysé le texte. Il est très utile dans le cas où un texte n'est pas clair ou s'il n'y a pas du tout de texte. Sinon, il sert surtout à consolider la réponse présente dans le texte. Ainsi, Juliette (Groupe B) indique dans sa réponse : « Si une cellule est mutée alors tout son noyau est muté et donc tout ce qui se trouve à l'intérieur est muté. » La notion de « tout ce qui est à l'intérieur » n'est pas claire et il est donc intéressant d'analyser le dessin pour la compléter.



Dessin de Juliette.

L'analyse de son dessin nous mène à classer sa réponse dans la catégorie ADN, puisqu'elle y indique que l'information génétique est mutée.

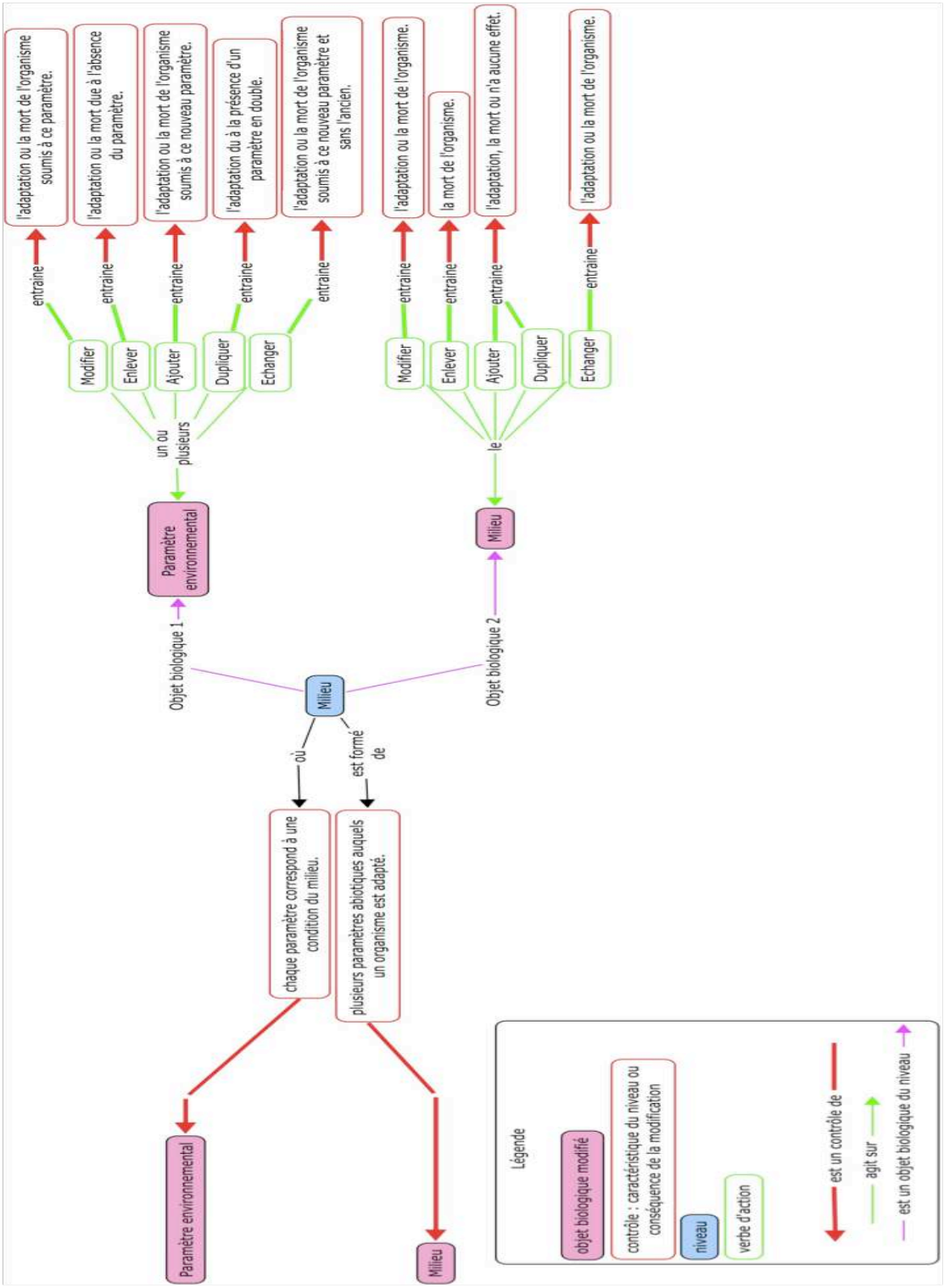
De plus, s'il n'y a aucun texte, c'est seulement le dessin qui permet de classer la réponse de l'élève. Comme dans l'exemple d'Aline (Groupe A), dont la réponse est finalement classée dans la catégorie Noyau grâce au dessin.



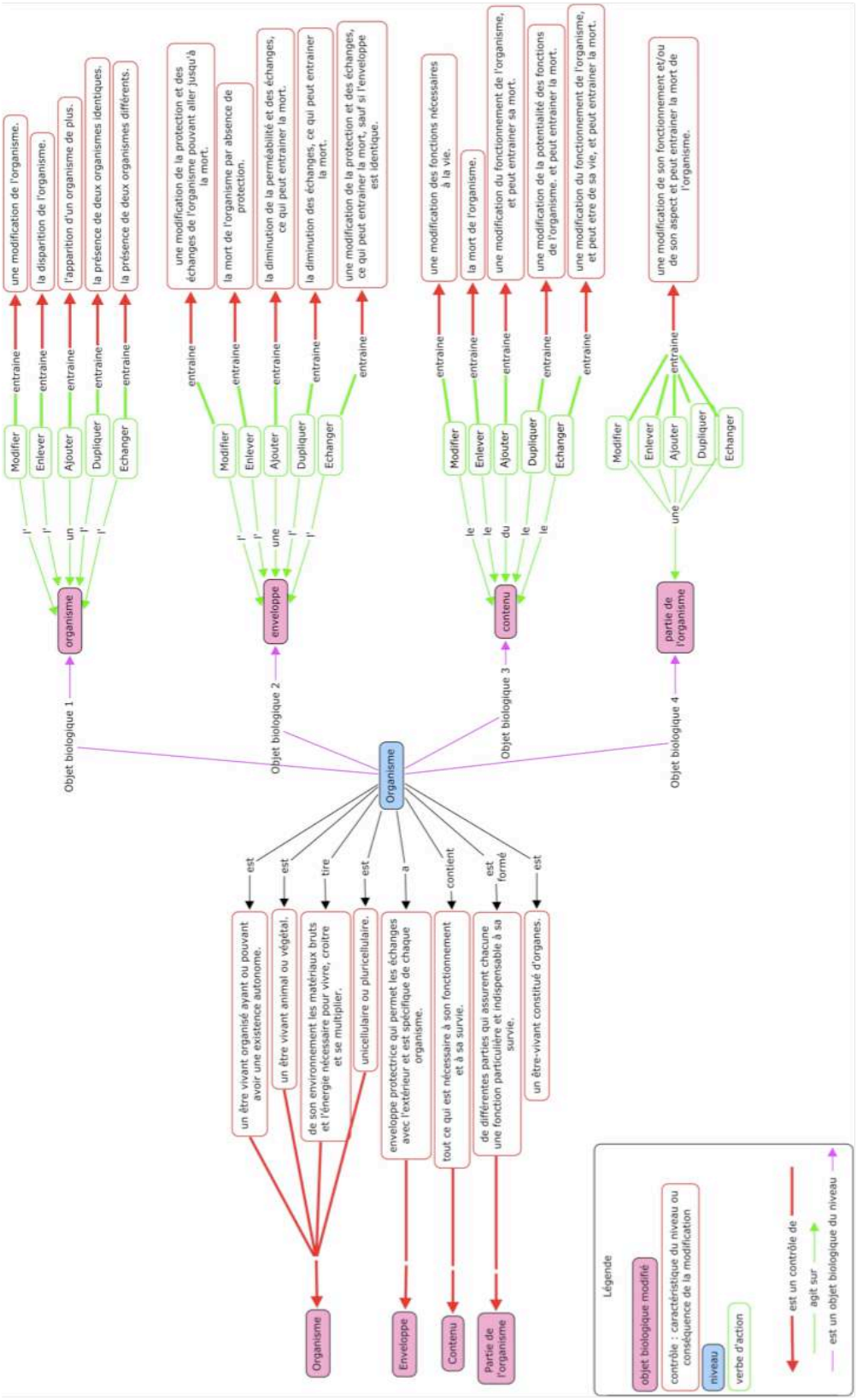
Production d'Aline

Annexe III : Cartes conceptuelles complètes

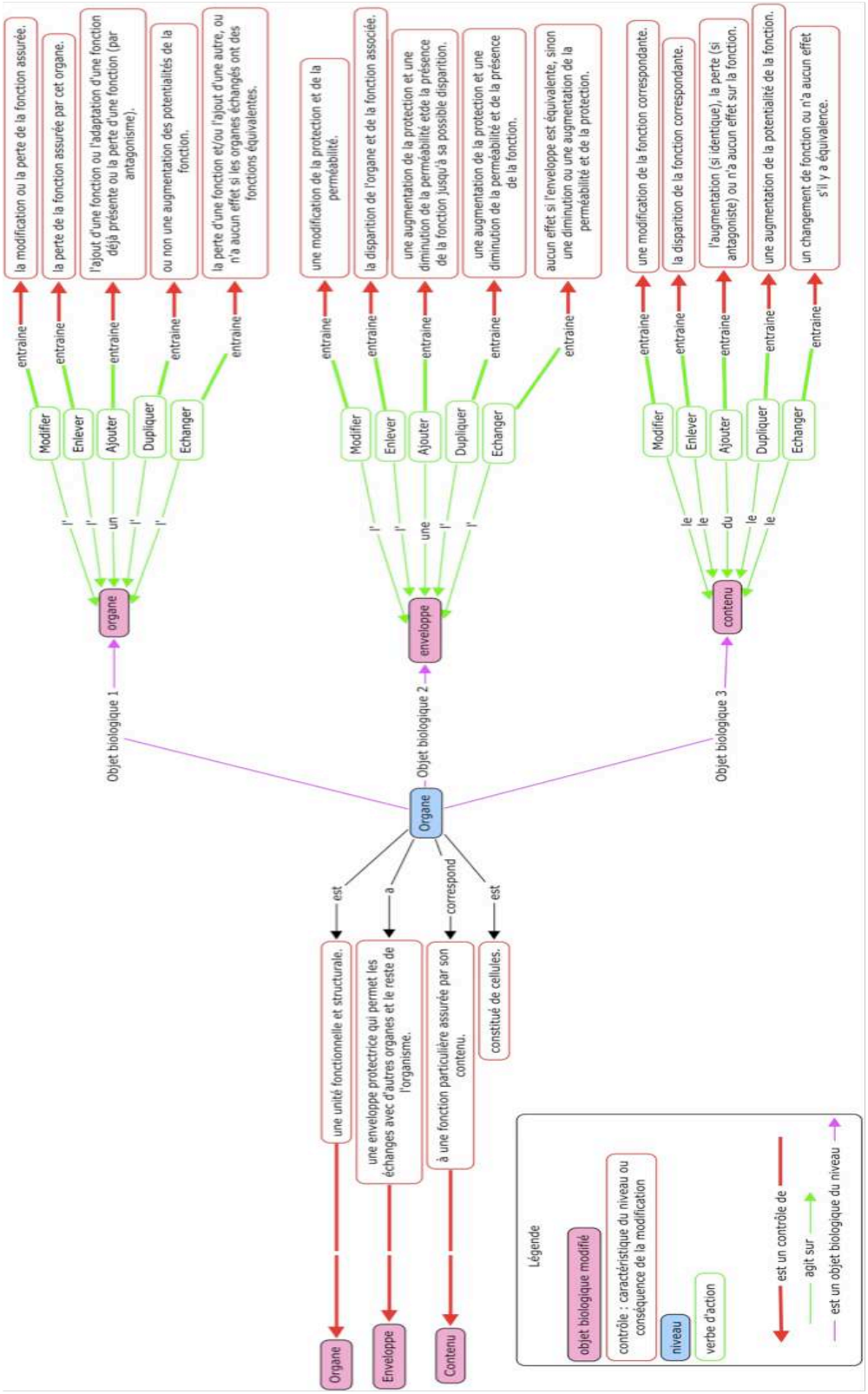
Niveau Milieu



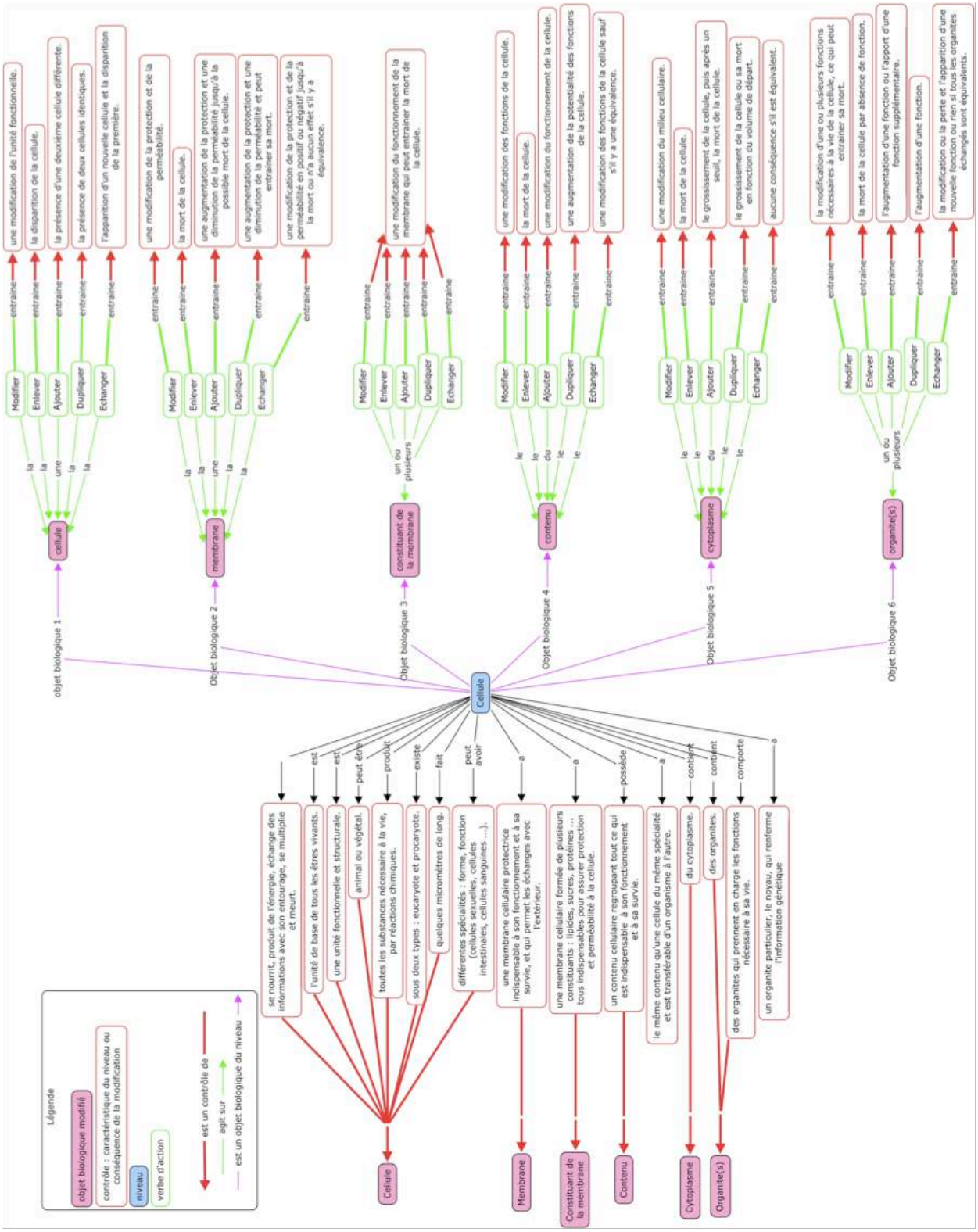
Niveau Organisme



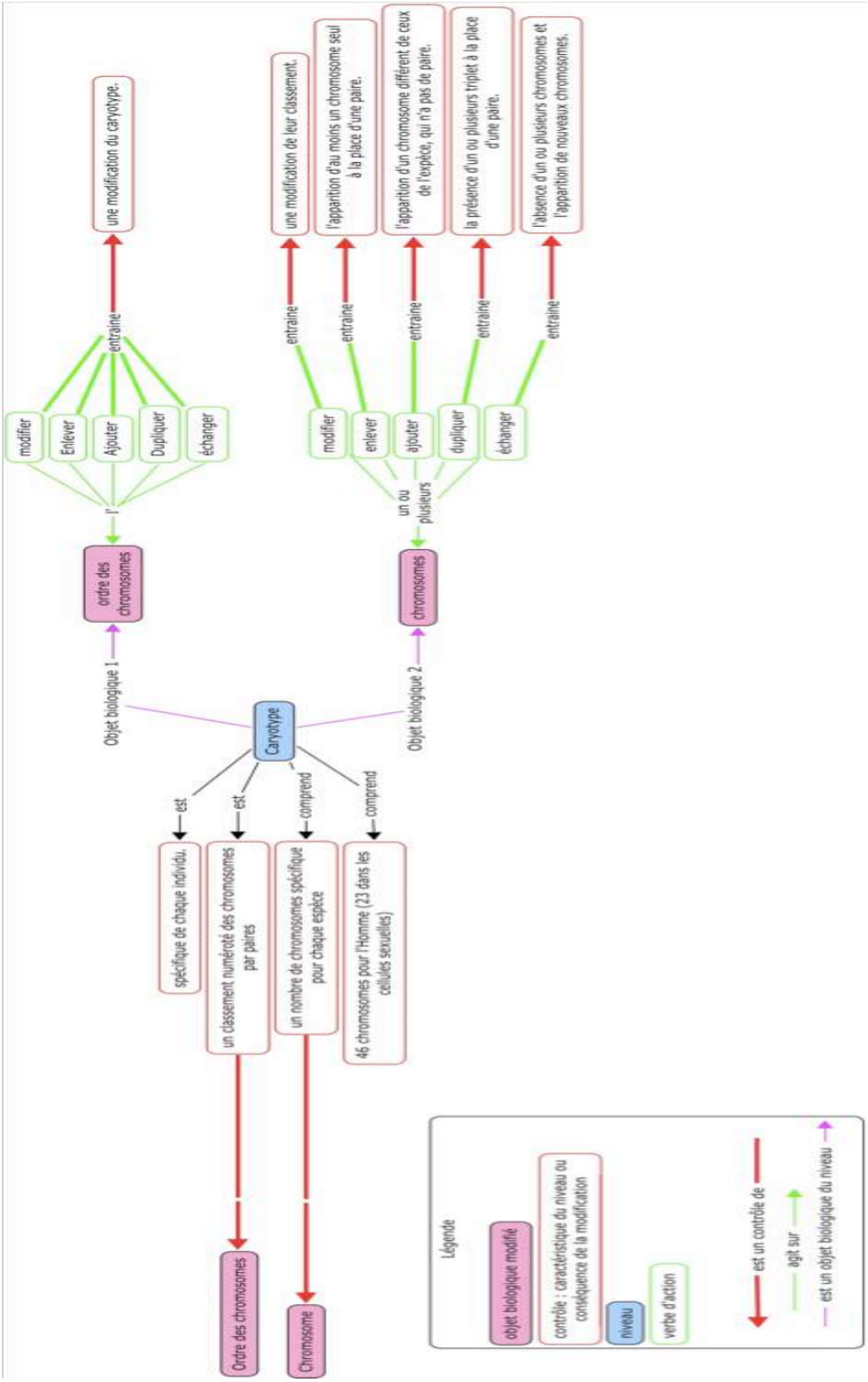
Niveau Organe :



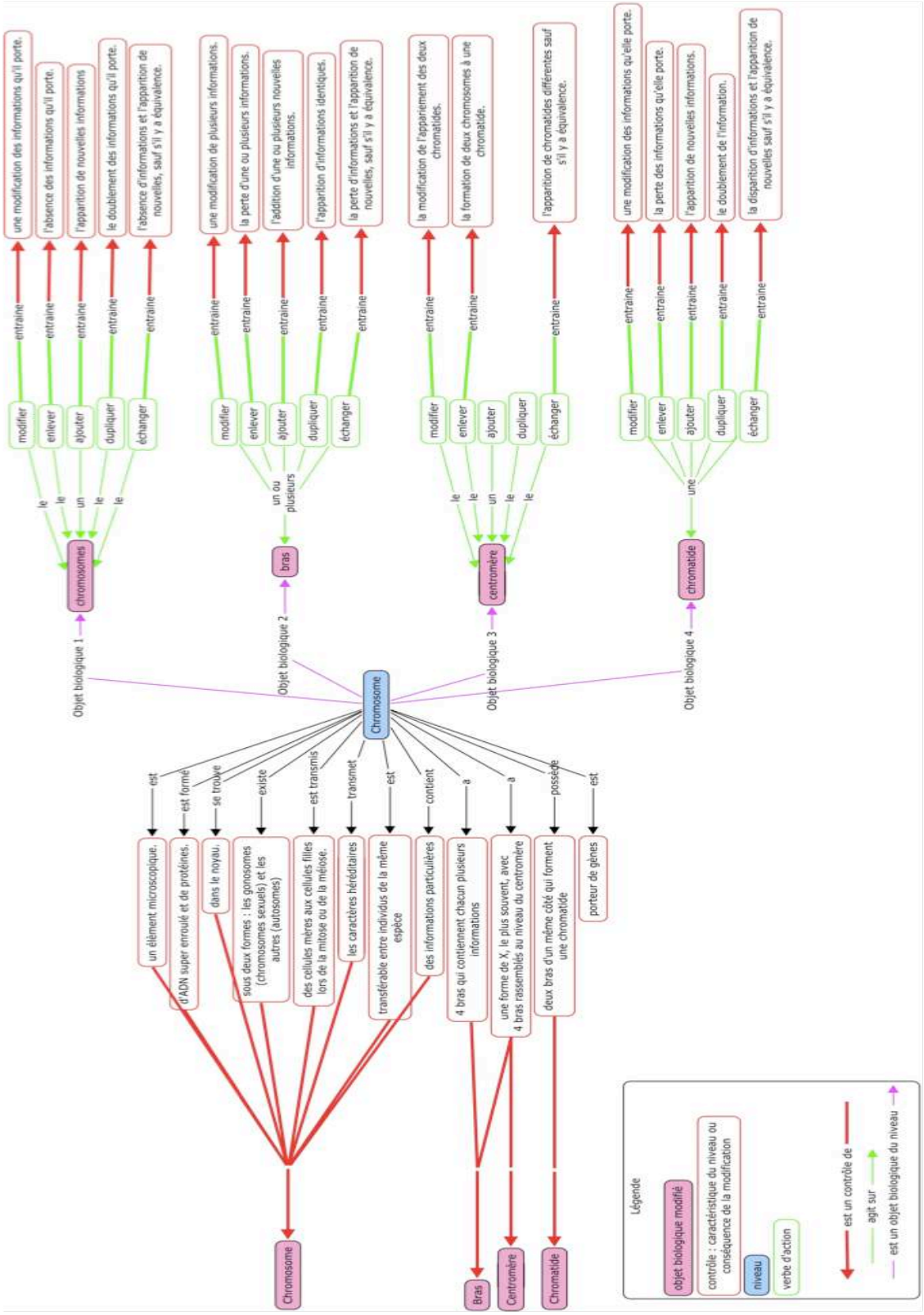
Niveau Cellule :



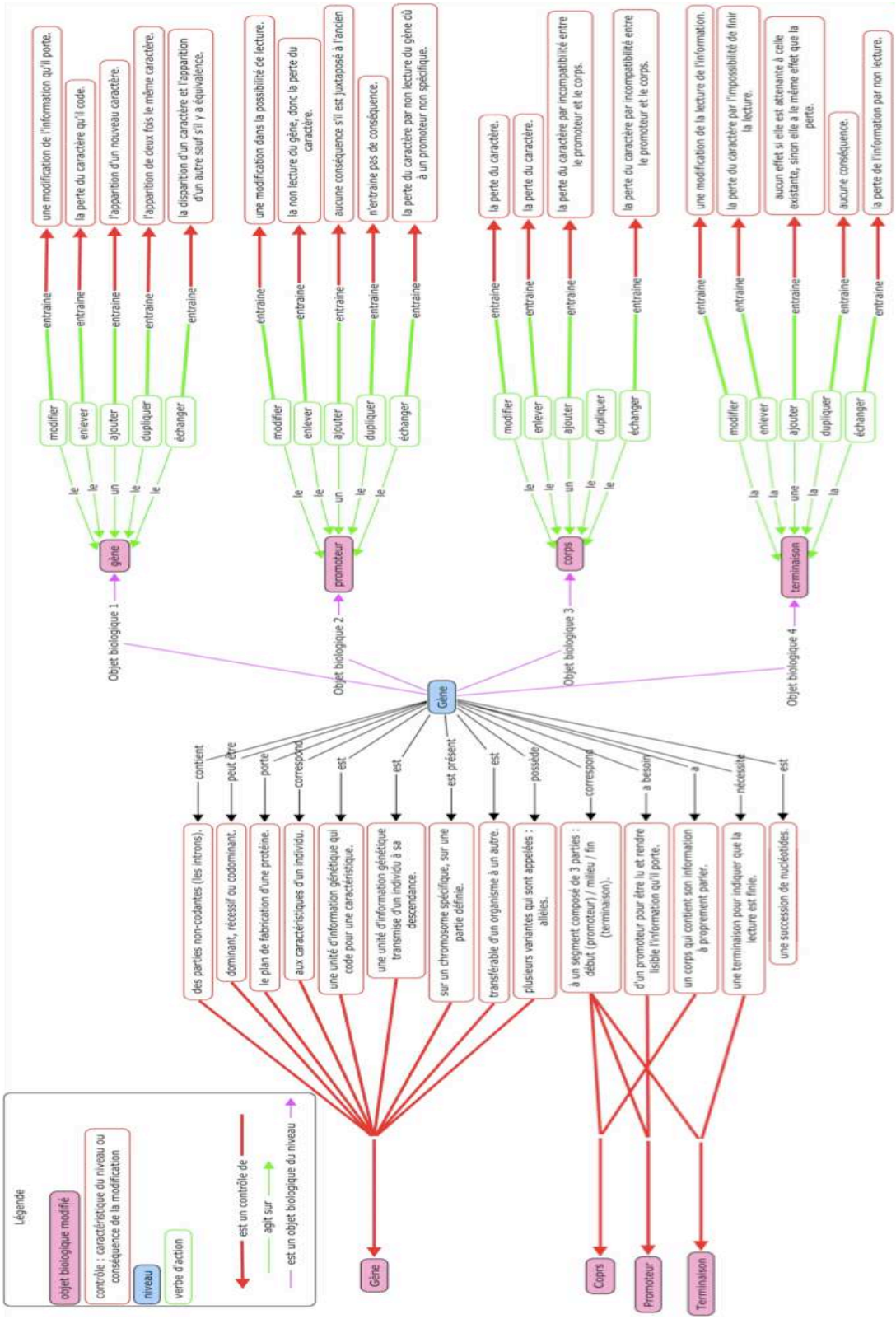
Niveau Caryotype



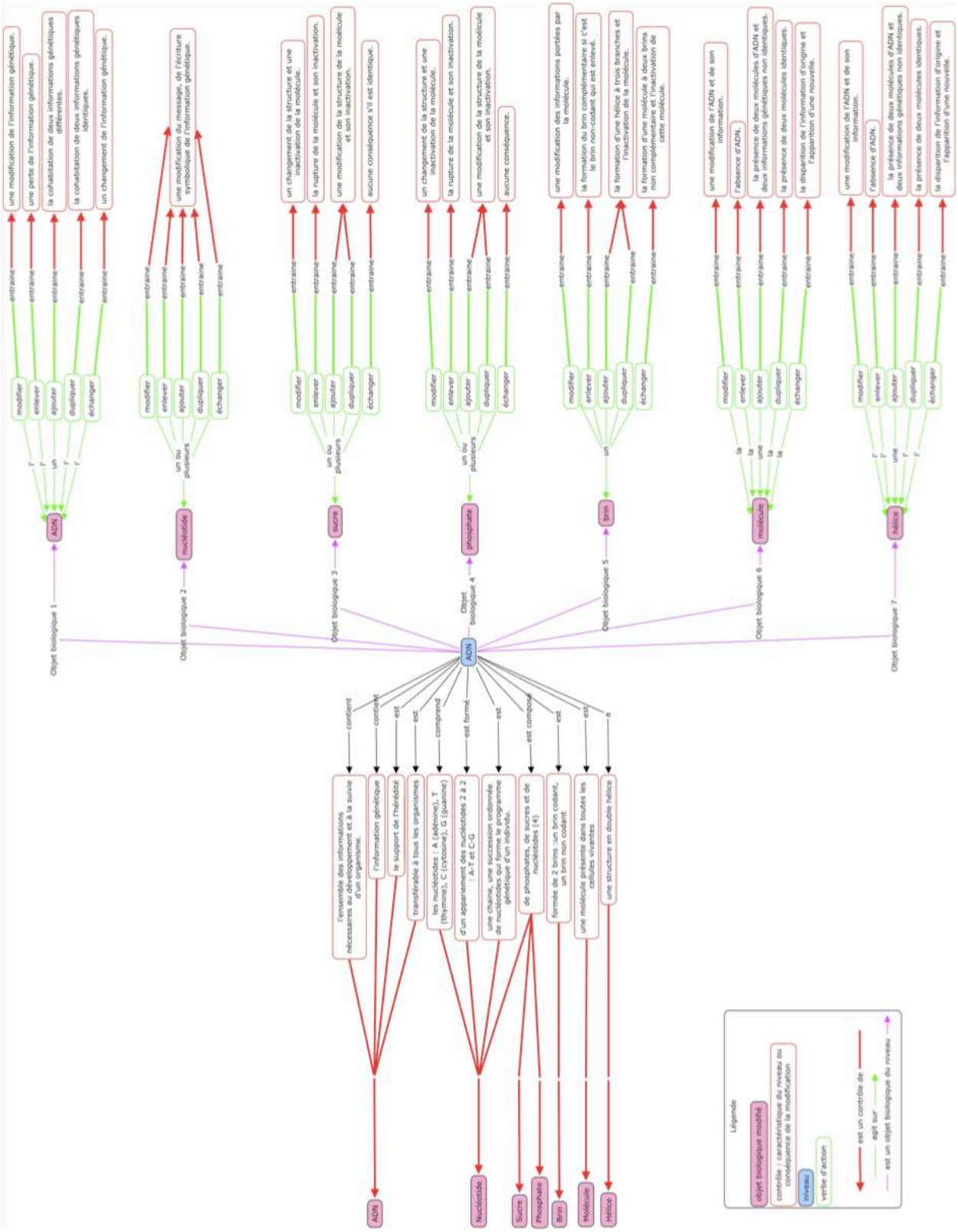
Niveau Chromosome



Niveau Gène

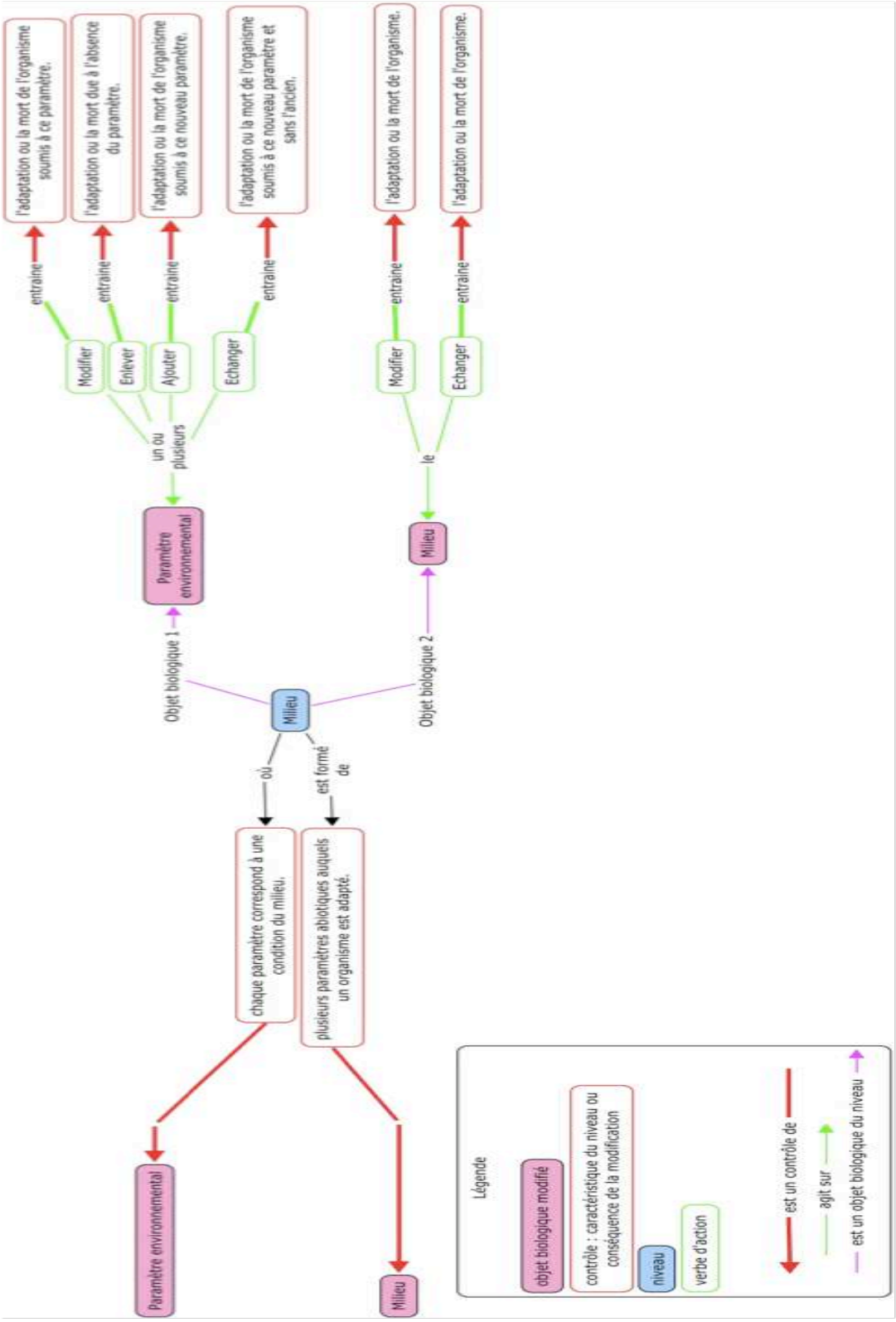

Légende
objet biologique modifié
contrôle : caractéristique du niveau ou conséquence de la modification
niveau
verbe d'action
est un contrôle de
agit sur
est un objet biologique du niveau
Gène
Corps
Promoteur
Terminaison
des parties non-codantes (les introns).
dominant, récessif ou codominant.
le plan de fabrication d'une protéine.
aux caractéristiques d'un individu.
une unité d'information génétique qui code pour une caractéristique.
une unité d'information génétique transmise d'un individu à sa descendance.
sur un chromosome spécifique, sur une partie définie.
transférable d'un organisme à un autre.
plusieurs variantes qui sont appelées : allèles.
à un segment composé de 3 parties : début (promoteur) / milieu / fin (terminaison).
d'un promoteur pour être lu et rendre lisible l'information qu'il porte.
un corps qui contient son information à proprement parler.
une terminaison pour indiquer que la lecture est finie.
une succession de nucléotides.
contient
peut être
porte
correspond
est
est
est présent
est
possède
correspond
a besoin
a
nécessite
est
Gène
Objet biologique 1
Objet biologique 2
Objet biologique 3
Objet biologique 4
gène
promoteur
corps
terminaison
modifier
enlever
ajouter
dupliquer
échanger
entraine
une modification de l'information qu'il porte.
la perte du caractère qu'il code.
l'apparition d'un nouveau caractère.
l'apparition de deux fois le même caractère.
la disparition d'un caractère et l'apparition d'un autre sauf s'il y a équivalence.
une modification dans la possibilité de lecture.
la non lecture du gène, donc la perte du caractère.
aucune conséquence s'il est juxtaposé à l'ancien
n'entraine pas de conséquence.
la perte du caractère par non lecture du gène dû à un promoteur non spécifique.
la perte du caractère.
la perte du caractère.
la perte du caractère par incompatibilité entre le promoteur et le corps.
la perte du caractère par incompatibilité entre le promoteur et le corps.
une modification de la lecture de l'information.
la perte du caractère par l'impossibilité de finir la lecture.
aucun effet si elle est attenante à celle existante, sinon elle a le même effet que la perte.
aucune conséquence.
la perte de l'information par non lecture.

Niveau ADN

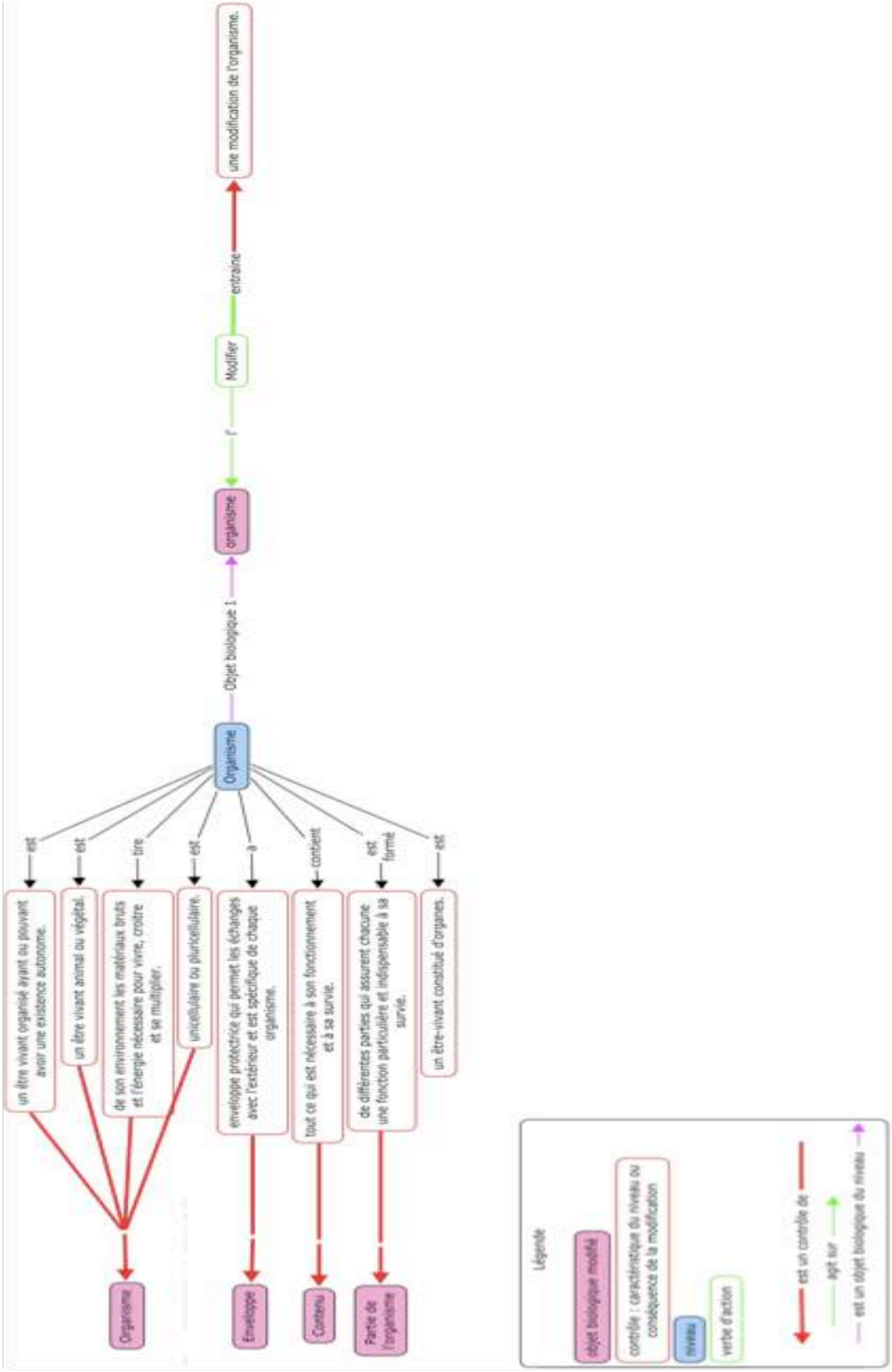

une modification de l'information génétique.
une perte de l'information génétique.
la cohabitation de deux informations génétiques différentes.
la cohabitation de deux informations génétiques identiques.
un changement de l'information génétique.
une modification du message, de l'écriture symbolique de l'information génétique.
un changement de la structure et une inactivation de la molécule.
la rupture de la molécule et son inactivation.
une modification de la structure de la molécule et son inactivation.
aucune conséquence s'il est identique.
un changement de la structure et une inactivation de la molécule.
la rupture de la molécule et son inactivation.
une modification de la structure de la molécule et son inactivation.
aucune conséquence.
une modification des informations portées par la molécule.
la formation du brin complémentaire si c'est le brin non-codant qui est enlevé.
la formation d'une hélice à trois branches et l'inactivation de la molécule.
la formation d'une molécule à deux brins non complémentaire et l'inactivation de cette molécule.
une modification de l'ADN et de son information.
l'absence d'ADN.
la présence de deux molécules d'ADN et deux informations génétiques non identiques.
la présence de deux molécules identiques.
la disparition de l'information d'origine et l'apparition d'une nouvelle.
une modification de l'ADN et de son information.
l'absence d'ADN.
la présence de deux molécules d'ADN et deux informations génétiques non identiques.
la présence de deux molécules identiques.
la disparition de l'information d'origine et l'apparition d'une nouvelle.
entraine
modifier
enlever
ajouter
dupliquer
échanger
un ou plusieurs
un
ADN
nucléotide
sucre
phosphate
brin
molécule
hélice
Objet biologique 1
Objet biologique 2
Objet biologique 3
Objet biologique 4
Objet biologique 5
Objet biologique 6
Objet biologique 7
ADN
contient
contient
est
est
comprend
est formé
est
est composé
est
est
a
l'ensemble des informations nécessaires au développement et à la suivie d'un organisme.
l'information génétique
le support de l'hérédité
transférable à tous les organismes
les nucléotides : A (adénine), T (thymine), C (cytosine), G (guanine)
d'un appariement des nucléotides 2 à 2 : A-T et C-G
une chaine, une succession ordonnée de nucléotides qui forme le programme génétique d'un individu.
de phosphates, de sucres et de nucléotides (4)
formée de 2 brins : un brin codant, un brin non codant
une molécule présente dans toutes les cellules eucaryotes
une structure en double hélice
ADN
Nucléotide
Sucre
Phosphate
Brin
Molécule
Hélice
Légende
objet biologique modifié
contrôle ; caractéristique du niveau ou conséquence de la modification
niveau
verbe d'action
est un contrôle de
agit sur
est un objet biologique du niveau

Annexe IV : Cmap corrigées

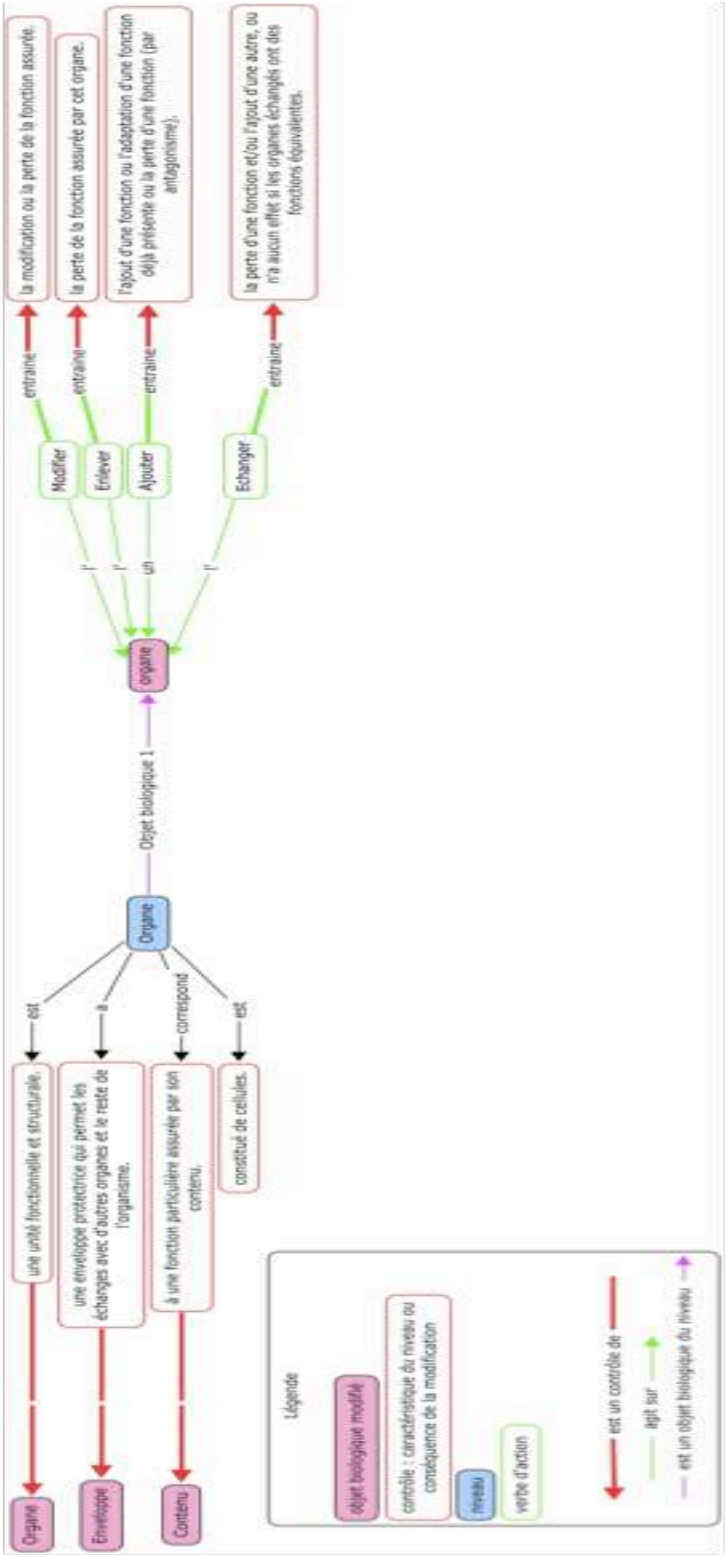
Niveau Milieu



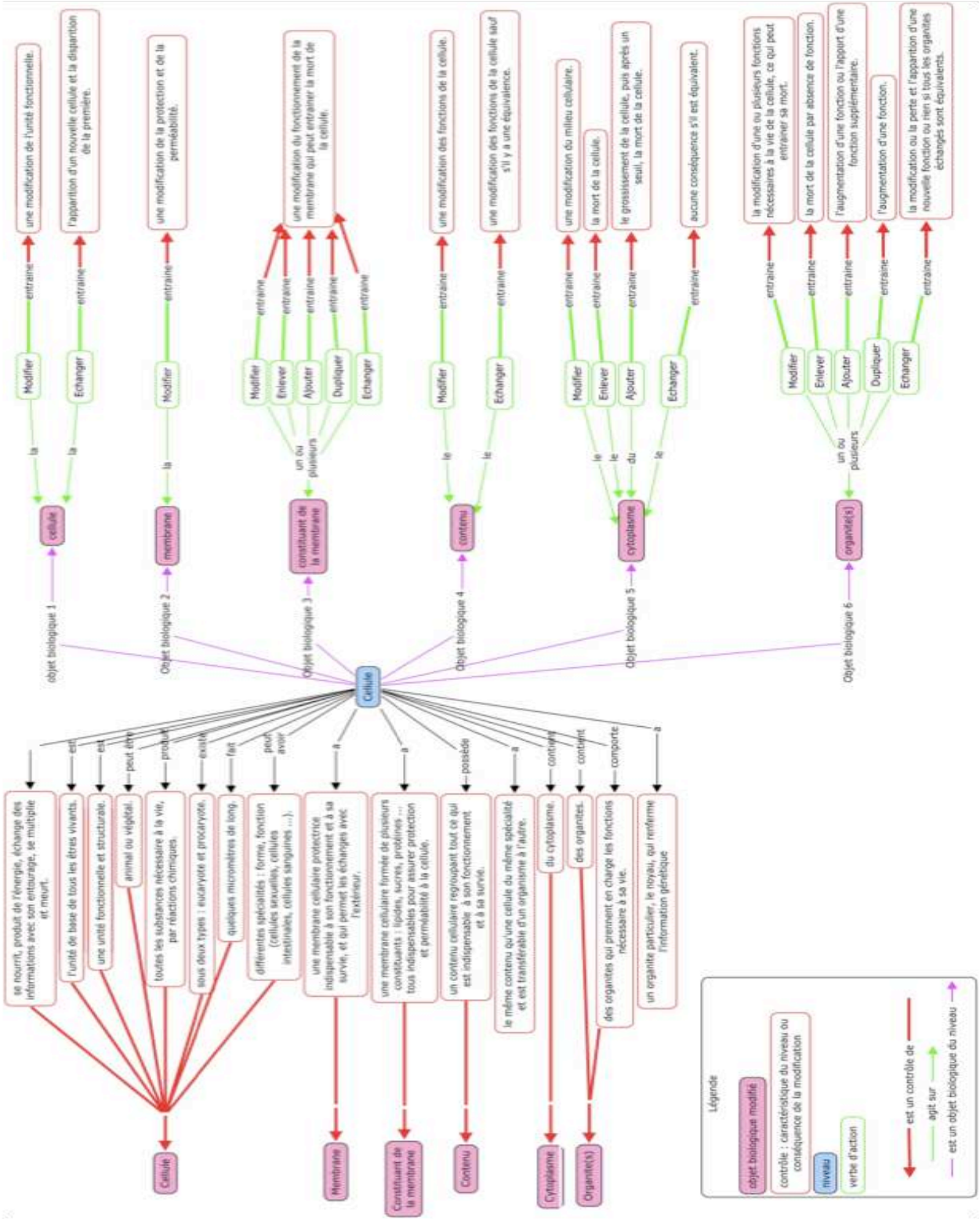
Niveau Organisme



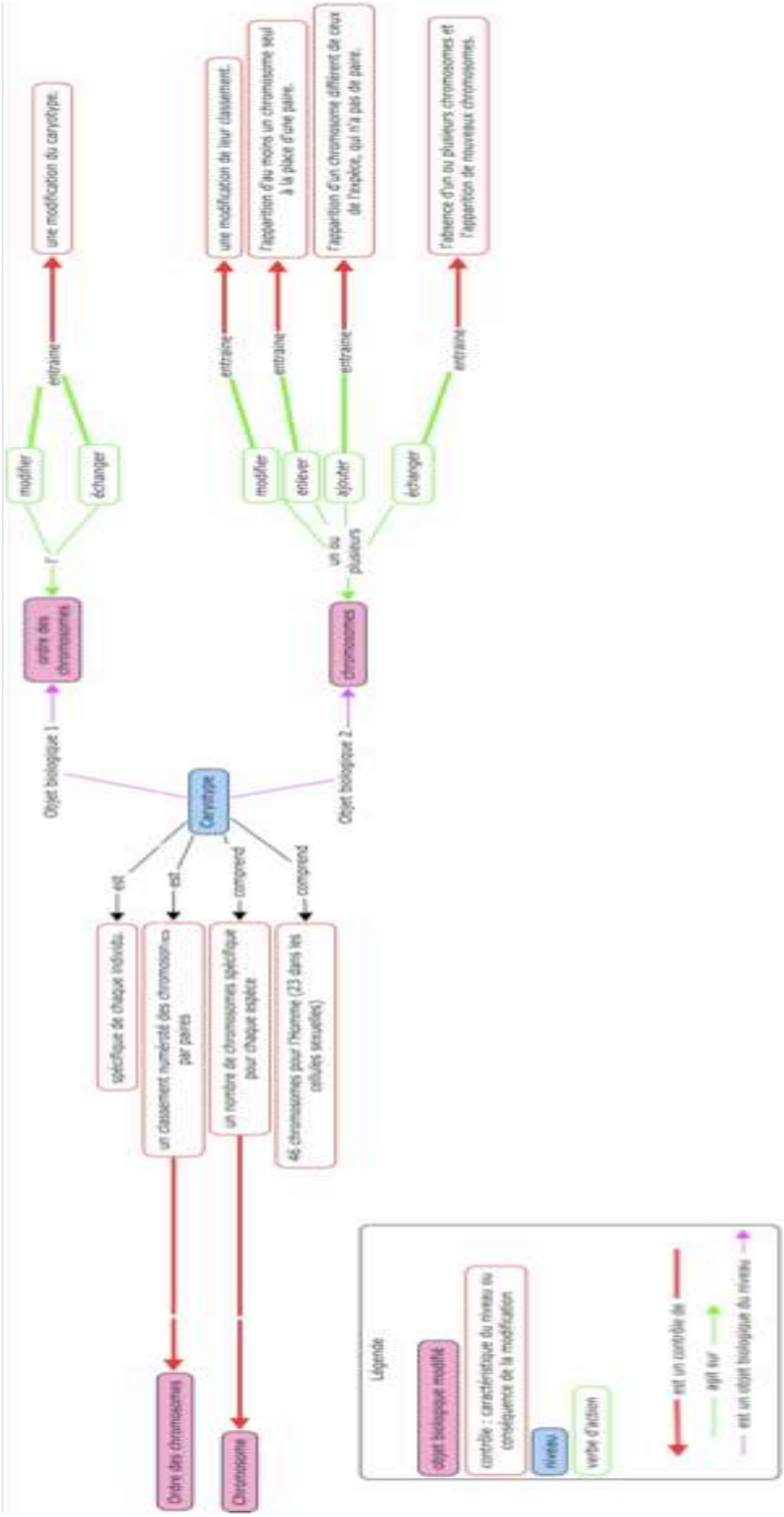
Niveau Organe



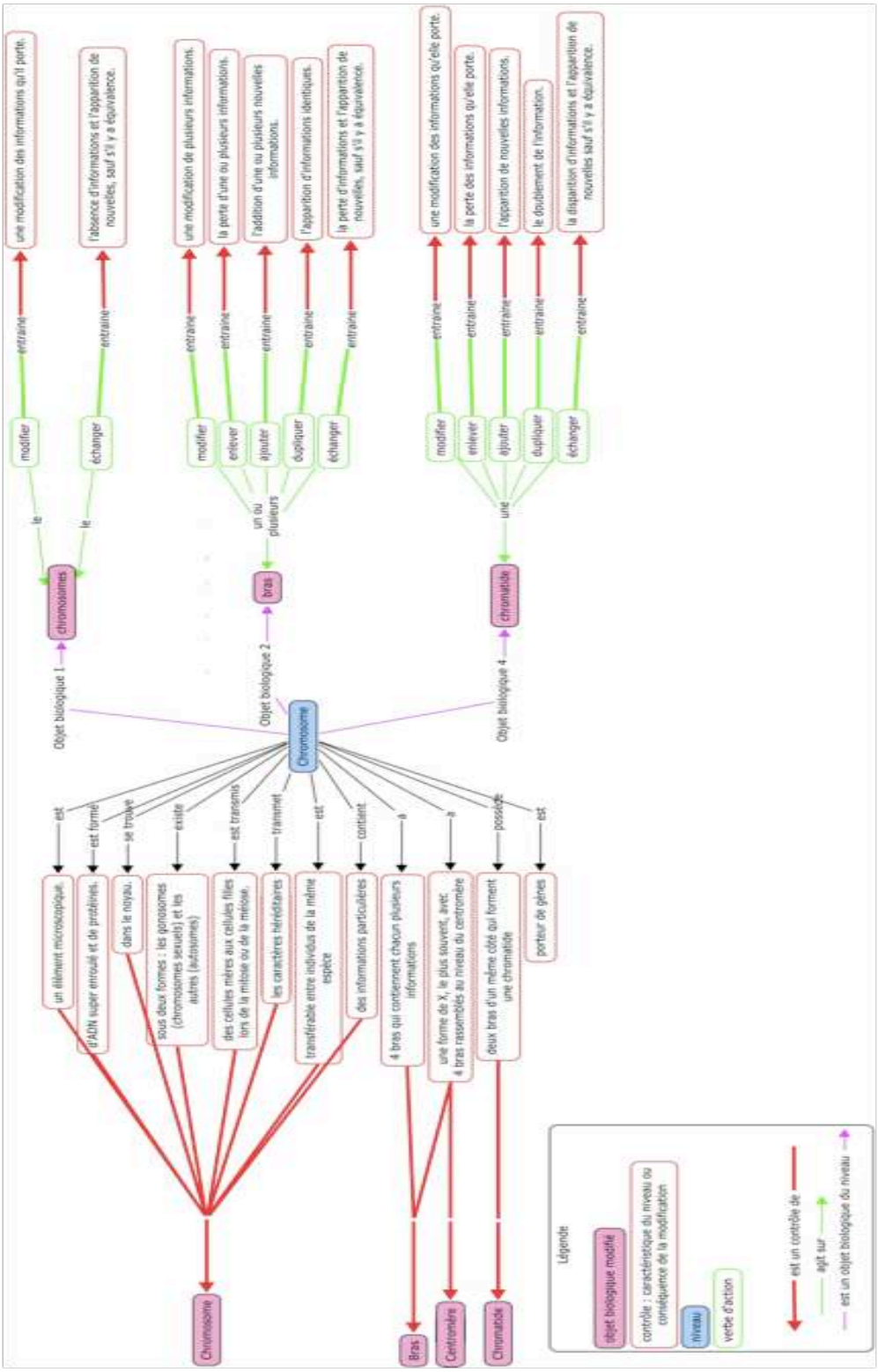
Niveau Cellule



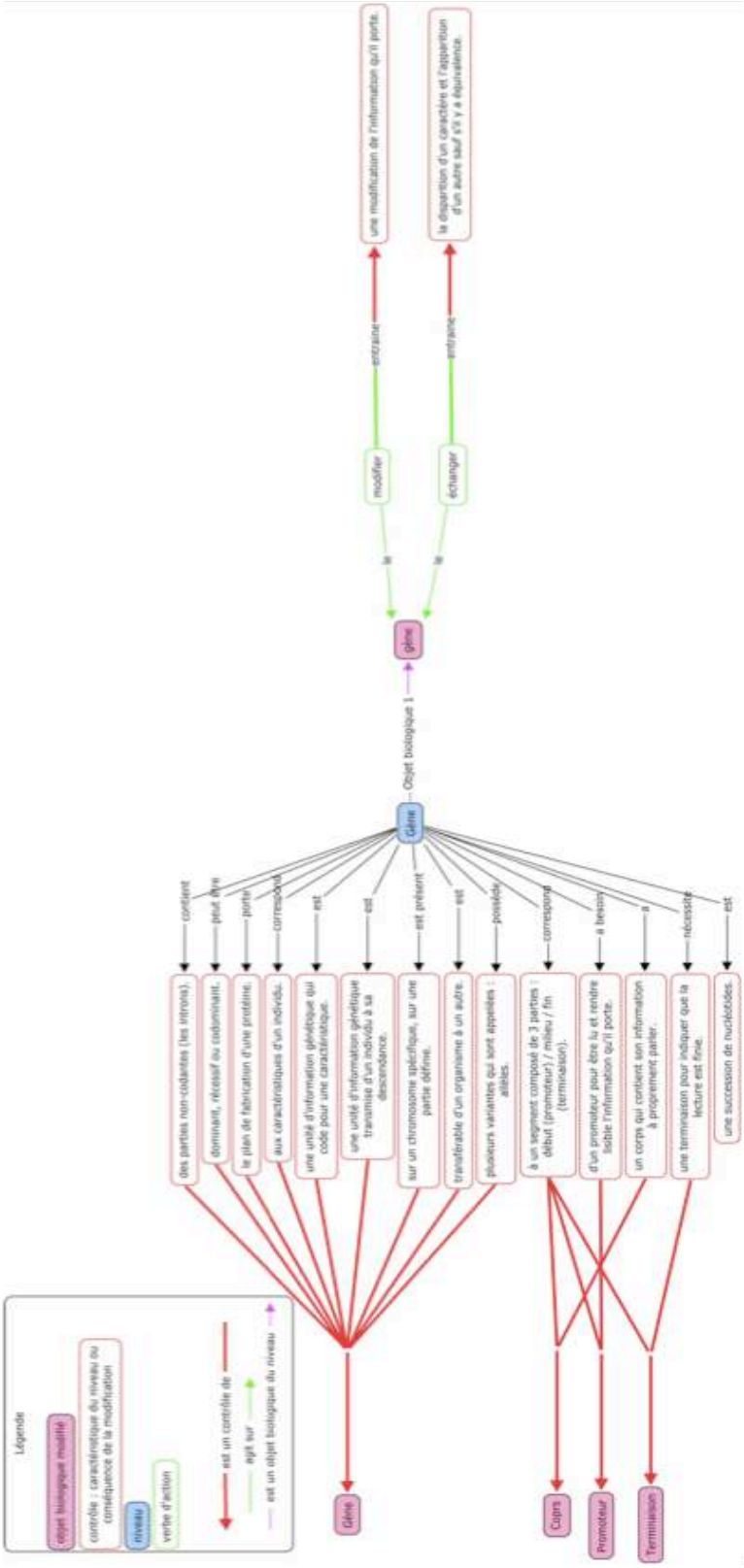
Niveau Caryotype



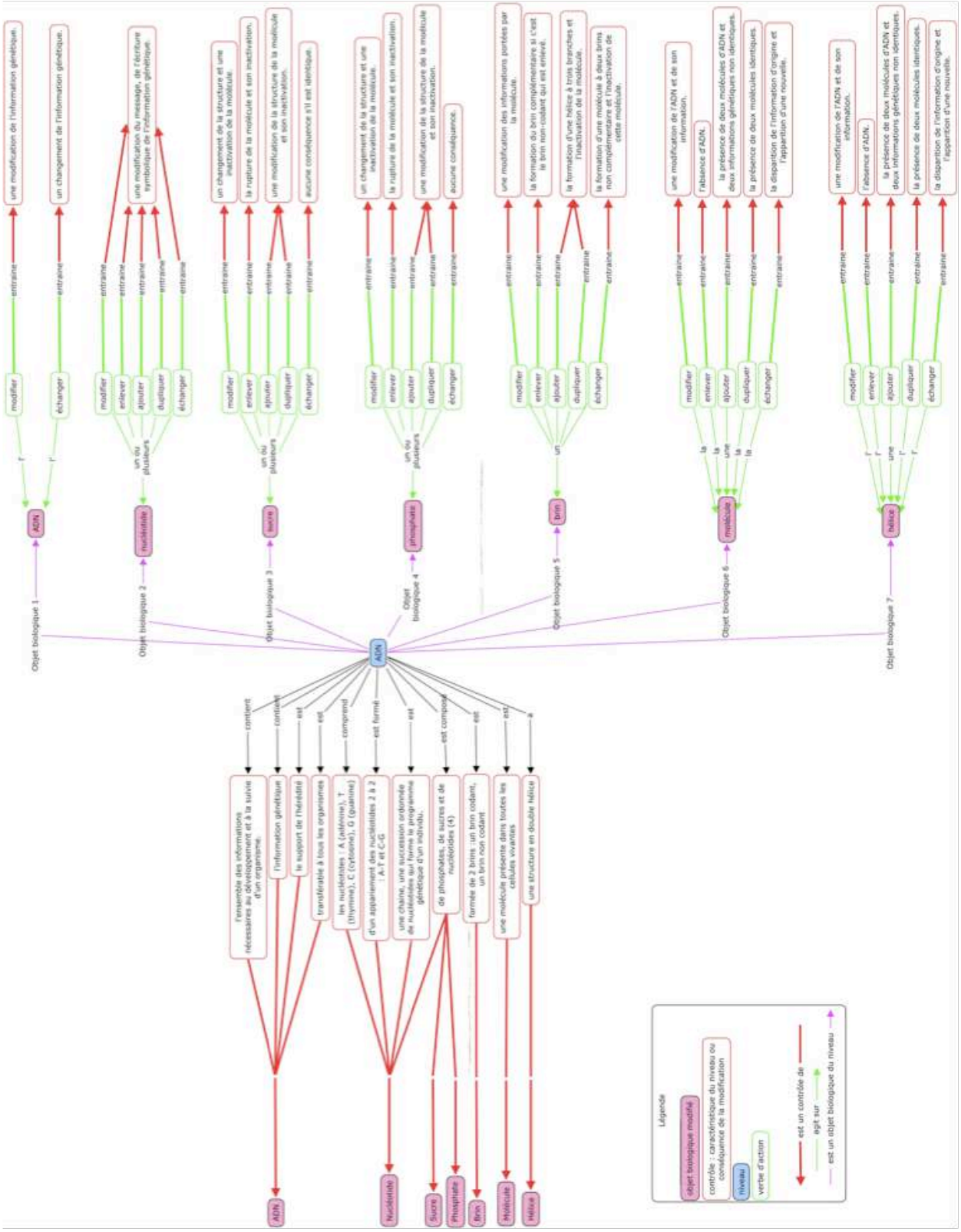
Niveau Chromosome



Niveau Gène


Légende
objet biologique modifié
contrôle : caractéristique du niveau ou conséquence de la modification
niveau
verbe d'action
est un contrôle de
agit sur
est un objet biologique du niveau
Gène
Gène
Objet biologique 1
gène
contient
peut être
porte
correspond
est
est
est présent
est
possède
correspond
a besoin
a
nécessite
est
des parties non-codantes (les introns).
dominant, récessif ou codominant.
le plan de fabrication d'une protéine.
aux caractéristiques d'un individu.
une unité d'information génétique qui code pour une caractéristique.
une unité d'information génétique transmise d'un individu à sa descendance.
sur un chromosome spécifique, sur une partie définie.
transférable d'un organisme à un autre.
plusieurs variantes qui sont appelées : allèles.
à un segment composé de 3 parties : début (promoteur) / milieu / fin (terminaison).
d'un promoteur pour être lu et rendre lisible l'information qu'il porte.
un corps qui contient son information à proprement parler.
une terminaison pour indiquer que la lecture est finie.
une succession de nucléotides.
modifier
échanger
entraîne
entraîne
une modification de l'information qu'il porte.
la disparition d'un caractère et l'apparition d'un autre sauf s'il y a équivalence.
Corps
Promoteur
Terminaison

Niveau ADN


ADN
Objet biologique 1
Objet biologique 2
Objet biologique 3
Objet biologique 4
Objet biologique 5
Objet biologique 6
Objet biologique 7
nucléotide
sucre
phosphate
brin
molécule
hélice
modifier
échanger
enlever
ajouter
dupliquer
entraine
un ou plusieurs
contient
est
comprend
est formé
est composé
a
l'ensemble des informations nécessaires au développement et à la survie d'un organisme.
l'information génétique
le support de l'hérédité
transférable à tous les organismes
les nucléotides : A (adénine), T (thymine), C (cytosine), G (guanine).
d'un appariement des nucléotides 2 à 2 : A-T et C-G
une chaine, une succession ordonnée de nucléotides, qui forme le programme génétique d'un individu.
de phosphates, de sucres et de nucléotides (4)
formée de 2 brins : un brin codant, un brin non codant
une molécule présente dans toutes les cellules vivantes
une structure en double hélice
Légende
objet biologique modifié
contrôle : caractéristique du niveau ou conséquence de la modification
niveau
verbe d'action
est un contrôle de
agit sur
est un objet biologique du niveau

Annexe V : Tableaux cK⊄ pour tous les niveaux

Niveau Milieu

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Milieu	Paramètre environnemental	Texte	Modifier / Changer un paramètre environnemental	Un paramètre environnemental définit une condition particulière du milieu auquel l'organisme est adapté.	La modification d'un paramètre environnemental entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme soumis à ce paramètre.
			Enlever/Détruire un paramètre environnemental		La perte d'un paramètre environnemental entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme due à l'absence de ce paramètre.
			Ajouter un paramètre environnemental		L'ajout d'un paramètre environnemental entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme soumis à ce nouveau paramètre.
			Dupliquer un paramètre environnemental		La duplication d'un paramètre entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme due à la présence en double d'un paramètre.

			Echanger un paramètre environnemental		L'échange d'un paramètre par un autre entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme soumis à ce nouveau paramètre et sans l'ancien.
	Milieu		Modifier le milieu	L'ensemble des paramètres environnementaux forme le milieu de vie de l'organisme auquel il est adapté.	Une modification du milieu de vie d'un organisme entraîne une adaptation ou la mort.
			Enlever le milieu		La perte du milieu entraine la mort de l'organisme.
			Ajouter un milieu		L'ajout d'un milieu entraine l'adaptation d'un d'organisme, ou sa mort, ou n'a aucun effet.
			Dupliquer le milieu		La duplication du milieu entraine l'adaptation, la mort ou n'a aucun effet sur l'organisme.
			Echanger le milieu par un autre		Un échange de milieu de vie entraîne l'adaptation ou la mort de l'organisme soumis à ce milieu.
		Graphique	Formes symbolisant des	Le milieu rassemble différents	

			arbres, le soleil	paramètres comme la température, l'ensoleillement, la présence de végétation …	

Niveau Organisme

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Organisme	Organisme	Texte	Modifier / Changer l'organisme	Un organisme est un être-vivant organisé ayant ou pouvant avoir une existence autonome. C'est un être vivante animal ou végétal. Il tire de son environnement les matériaux bruts et l'énergie nécessaire pour vivre, croître et se multiplier. Il est unicellulaire ou pluricellulaire.	La modification de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement.
			Enlever/Détruire l'organisme		La perte de l'organisme entraine la disparition de l'organisme.
			Ajouter un organisme		L'ajout d'un organisme entraine l'apparition d'un organisme de plus.
			Dupliquer l'organisme		La duplication d'un organisme entraine la présence de deux organismes identiques.
			Echanger l'organisme		L'échange de l'organisme entraine la présence d'un organisme étranger.
	Enveloppe de l'organisme		Modifier l'enveloppe de l'organisme	L'enveloppe de l'organisme permet de protéger son contenu et sa perméabilité permet d'assurer les	La modification de l'enveloppe de l'organisme entraine une modification de la protection et des échanges de l'organisme.

			Enlever/détruire l'enveloppe de l'organisme	échanges intérieur - extérieur. Elle est spécifique de chaque organisme.	L'absence d'enveloppe de l'organisme entraine une mort de l'organisme par absence de protection.
			Ajouter une enveloppe à l'organisme		L'ajout d'une enveloppe entraine l'augmentation de l'imperméabilité et une diminution des échanges qui peut entrainer la mort de l'organisme.
			Dupliquer l'enveloppe de l'organisme		La duplication de l'enveloppe de l'organisme entraine une diminution des échanges et peut entrainer la mort.
			Echanger l'enveloppe de l'organisme		L'échange d'enveloppe entraine une modification de la protection et des échanges, ce qui peut entrainer la mort de l'organisme, sauf si l'enveloppe est identique.
	Contenu de l'organisme		Modifier / Changer le contenu de l'organisme	Le contenu de l'organisme contient tout ce qui est utile pour assurer les fonctions nécessaires à la vie et au	La modification du contenu de l'organisme entraine une modification des fonctions nécessaire à sa

			Modifier / Changer le contenu de l'organisme		vie.
			Enlever / Détruire le contenu de l'organisme		L'absence de contenu d'organisme entraine la mort de l'organisme.
			Ajouter un contenu d'organisme	fonctionnement de l'organisme.	L'ajout d'un contenu d'organisme entraine une modification du fonctionnement de l'organisme et peut entrainer sa mort.
	Contenu de l'organisme		Dupliquer le contenu de l'organisme		La duplication du contenu de l'organisme entraine une modification de la potentialité des fonctions de l'organisme.
			Echanger le contenu de l'organisme		L'échange du contenu de l'organisme entraine une modification du fonctionnement de l'organisme et peut être de sa vie.
	Partie de l'organisme		Modifier / Changer une partie de l'organisme	Chaque partie de l'organisme assure une fonction particulière pour l'organisme qui est parfois indispensable à sa survie.	La modification d'une partie de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement ou de son aspect et peut entrainer

			Modifier / Changer une partie de l'organisme		sa mort.
			Enlever / Détruire une partie de l'organisme		L'absence d'une partie de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement et / ou de son aspect et peut entrainer sa mort.
	Partie de l'organisme		Ajouter une partie d'organisme	L'ensemble fournit un aspect particulier à chaque organisme.	L'ajout d'une partie de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement et / ou de son aspect et peut entrainer sa mort.
			Dupliquer une partie de l'organisme		La duplication d'une partie de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement et / ou de son aspect et peut entrainer sa mort.
			Echanger une partie de l'organisme		L'échange d'une partie de l'organisme entraine une modification de son fonctionnement et / ou de son

					aspect et peut entrainer sa mort.
		Graphique	Un animal ou un végétal	Un organisme est un être vivant : animal ou végétal.	
			Un cercle représentant un organisme	Un organisme est un être vivant qui fonctionne comme une entité à part entière, de façon fermée.	

Niveau Organe

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Organe	Organe en entier	Texte	Modifier / Changer un organe	Un organe est une unité fonctionnelle et structurale du corps d'un organisme. Il correspond le plus souvent à une fonction particulière nécessaire au fonctionnement et à la survie de l'organisme.	Une modification d'un organe entraîne une modification ou une perte de la fonction assurée par cet organe.
			Enlever / Détruire un organe		L'absence d'un organe entraîne la perte de la fonction assurée par cet organe.
			Ajouter un organe		L'ajout d'un organe entraîne l'ajout d'une fonction, ou la perte d'une autre (fonction antagoniste) ou l'adaptation d'une fonction déjà présente.
			Dupliquer un organe		La duplication d'un organe entraîne ou non une augmentation des potentialités de la fonction assurée par cet organe.

			Echanger un organe		L'échange de deux organes entraîne la perte d'une fonction et/ou l'ajout d'une autre ou n'a aucun effet si les deux organes ont des fonctions équivalentes.
	Enveloppe de l'organe		Modifier / Changer l'enveloppe d'un organe	L'enveloppe d'un organe sert de barrière perméable et protectrice avec le reste du corps de l'organisme. Elle permet de faire circuler certains produits entre l'organe et le reste de l'organisme dans un sens comme dans l'autre et protège l'organe.	Une modification de l'enveloppe d'un organe entraîne une augmentation ou une diminution de la perméabilité et de la protection formées par cette enveloppe.
			Enlever /Détruire l'enveloppe d'un organe		L'absence d'enveloppe autour d'un organe entraîne la disparition de cet organe et de la fonction associée.
			Ajouter une enveloppe à un organe		L'ajout d'une enveloppe entraine une augmentation de la protection mais aussi une diminution de la perméabilité et la fonction de l'organe est moins présente au niveau de l'organisme, elle peut même disparaître si l'enveloppe est trop imperméable.

			Dupliquer l'enveloppe d'un organe		La duplication de l'enveloppe entraine une augmentation de la protection mais aussi une diminution de la perméabilité et la fonction de l'organe est moins présente au niveau de l'organisme.
			Echanger l'enveloppe d'un organe		L'échange d'enveloppe entre deux organes peut soit être sans effet (enveloppe équivalente), soit augmenter soit diminuer la perméabilité et la protection et donc la fonction de l'organe.
	Contenu de l'organe		Modifier / Changer le contenu d'un organe	Un organe possède un contenu délimité et séparé du reste du corps par une enveloppe. C'est le contenu qui permet d'assurer la fonction.	La modification du contenu d'un organe entraîne une modification de la fonction correspondante.
			Enlever / Détruire le contenu d'un organe		L'absence du contenu d'un organe entraîne la disparition de la fonction correspondante.
			Ajouter le contenu d'un organe		L'ajout du contenu d'un organe entraîne l'augmentation, la perte ou n'a aucun effet sur la fonction.

			Dupliquer le contenu d'un organe		La duplication du contenu d'un organe entraîne ou non, une augmentation de la potentialité de la fonction.
			Echanger le contenu d'un organe		L'échange du contenu d'un organe entraîne un changement de fonction. La nouvelle correspondra au nouveau contenu. Il n'y aura aucun effet s'il y a équivalence.
		Graphique	Une forme géométrique représentant un organe	Un organe est un ensemble organisé et délimité qui a une fonction précise.	
			Toute forme symbolisant un organe (cœur, foie, rein, bras...)	Le cœur, le foie, le rein ou le bras sont des organes.	

Niveau Cellule

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Cellule	Cellule en entier	Texte	Modifier /Changer une cellule	Une cellule est la plus petite unité fonctionnelle et structurale d'un être vivant. Elle se nourrit, produit de l'énergie, échange des informations avec son entourage, se multiplie et meurt. Elle est végétale ou animale. Elle produit toutes les substances nécessaires à sa vie, par réactions chimiques. Elle existe sous deux types : eucaryote et procaryote.	La modification d'une cellule entraîne une modification de l'unité fonctionnelle d'un être vivant.
			Enlever / Détruire une cellule		La perte de la cellule entraine sa disparition.
			Ajouter une cellule		L'ajout d'une cellule entraine la présence d'une cellule différente.
			Dupliquer une cellule		La duplication d'une cellule entraine la présence de deux cellules identiques.
			Echanger une cellule		L'échange de deux cellules entraine l'apparition d'une cellule et la disparition de la première.
	Membrane cellulaire		Modifier / Changer la membrane cellulaire	Une cellule est délimitée par une membrane qui sert de protection et dont la perméabilité permet les	La modification ou le changement de la membrane cellulaire entraîne une modification de ces fonctions de protection et de perméabilité.

			Enlever / Détruire la membrane cellulaire	échanges avec l'extérieur. Elle est indispensable au fonctionnement et à la survie de la cellule.	L'absence de la membrane cellulaire entraîne la mort de la cellule.
			Ajouter une membrane cellulaire		L'ajout d'une membrane cellulaire entraîne une augmentation de la protection et diminue la perméabilité voire l'annule.
			Dupliquer la membrane cellulaire		La duplication de la membrane cellulaire entraine une augmentation de la protection et de la l'imperméabilité.
			Echanger la membrane cellulaire		L'échange de la membrane cellulaire entraîne une modification de la protection et la perméabilité dans un sens (plus) ou dans l'autre (moins), ou n'a aucun effet s'il y équivalence.
	Constituant de la membrane cellulaire		Modifier / Changer un constituant de la membrane cellulaire	La membrane cellulaire est formée de différents constituants : des sucres, des lipides, des protéines … qui sont chacun indispensables à son bon fonctionnement : protection de la cellule et perméabilité avec	La modification d'un constituant de la membrane cellulaire entraîne une modification de son fonctionnement et peut entrainer la mort.
			Enlever / Détruire un constituant de la membrane cellulaire		

			Ajouter un constituant de la membrane cellulaire	l'extérieur.	
			Dupliquer un constituant de la membrane cellulaire		
			Echanger un constituant de la membrane cellulaire		
	Contenu cellulaire		Modifier / Changer le contenu cellulaire	Le contenu cellulaire regroupe tout ce qui est nécessaire à la vie et à la fonction de la cellule.	La modification du contenu cellulaire entraîne une modification des fonctions de la cellule.
			Enlever / Détruire le contenu cellulaire		L'absence de contenu cellulaire entraîne la mort de la cellule.
			Ajouter du contenu cellulaire		L'ajout de contenu cellulaire entraîne une modification du fonctionnement de la cellule.
			Dupliquer le contenu cellulaire		La duplication du contenu cellulaire entraîne une augmentation de la potentialité des fonctions cellulaires.

			Echanger le contenu cellulaire		Un échange du contenu cellulaire entraîne une modification du fonctionnement de la cellule, sauf s'il y a équivalence.
	Cytoplasme		Modifier / Changer le cytoplasme	Le cytoplasme est le milieu liquide qui constitue le contenu cellulaire.	Une modification du cytoplasme entraîne une modification du milieu cellulaire.
			Enlever / Détruire le cytoplasme		L'absence du cytoplasme entraîne la mort de la cellule.
			Ajouter du cytoplasme		L'ajout de cytoplasme entraîne le grossissement de la cellule, mais aucun changement au niveau fonctionnel. Si l'ajout est trop important la cellule meurt.
			Dupliquer le cytoplasme		La duplication du cytoplasme entraîne le grossissement de la cellule ou sa mort en fonction du volume de départ mais aucun changement au niveau fonctionnel.
			Echanger le cytoplasme		L'échange de cytoplasme n'entraîne pas de conséquence, s'il est équivalent.

	Un ou plusieurs organites cellulaires		Modifier / Changer un ou plusieurs organites cellulaires	Le contenu cellulaire baignant dans le cytoplasme est formé de plusieurs organites différents comme le noyau, les mitochondries, le réticulum… qui assurent tous des fonctions nécessaires à la vie de la cellule. Le noyau et les mitochondries contiennent de l'information génétique.	La modification d'un ou plusieurs organites entraîne la modification d'une ou plusieurs fonctions nécessaires à la vie de la cellule, ce qui peut entrainer sa mort.
			Enlever / Détruire un ou plusieurs organites cellulaires		L'absence d'un ou plusieurs organites entraîne la mort de la cellule, par absence de fonction.
			Ajouter un ou plusieurs organites cellulaires		L'ajout d'un ou plusieurs organites entraîne l'augmentation d'une fonction ou apporte une fonction supplémentaire.
			Dupliquer un ou plusieurs organites cellulaires		La duplication d'un ou plusieurs organites entraîne l'augmentation d'une fonction nécessaire à la vie de la cellule.
			Echanger un ou plusieurs organites cellulaires		L'échange d'un ou plusieurs organites entraîne ou non (si équivalence) une modification d'une fonction nécessaire à la vie de la cellule.

		Graphique	Un cercle représentant une cellule	Une cellule animal est une cellule ronde. C'est la représentation la plus rencontrée dans les manuels scolaires.	
			Un cercle représentant un organite	Une cellule contient plusieurs types d'organites qui peuvent être représentés schématiquement par un cercle.	
			Deux cercles parallèles très rapprochés symbolisant la membrane	La membrane est formée d'une double couche lipidique.	

Niveau Noyau

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Noyau	Noyau	Texte	Modifier / Changer le noyau	Le noyau est un composé essentiel de la cellule eucaryote, il contient toute l'information qui permet la reproduction de la cellule. Il fait en moyenne 5 µm de diamètre. Il contrôle les réactions du cytoplasme. Il stocke toutes les informations nécessaires à la division cellulaire. Le noyau est transférable d'une cellule à une autre.	Une modification du noyau entraîne une modification de la fonctionnalité du noyau.
			Enlever / Détruire le noyau		L'absence de noyau entraîne la disparition du noyau.
			Ajouter un noyau		L'ajout d'un noyau entraîne la présence de deux noyaux différents.
			Dupliquer le noyau		La duplication du noyau entraîne la présence de deux noyaux identiques.
			Echanger le noyau		L'échange du noyau entraîne la présence d'un noyau différent et de matériel génétique différent, sauf s'il y a équivalence.
	Enveloppe nucléaire		Modifier / Changer l'enveloppe nucléaire	Le noyau est délimité du cytoplasme cellulaire par l'enveloppe nucléaire qui le protège et assure la communication entre les deux	La modification de l'enveloppe nucléaire entraîne une modification de la protection du noyau et de la communication avec le cytoplasme.

			Enlever / Détruire l'enveloppe nucléaire	compartiments.	L'absence d'enveloppe nucléaire entraîne la mort du noyau.
			Ajouter une enveloppe nucléaire		L'ajout d'une enveloppe nucléaire entraîne une augmentation de la protection du noyau et diminue la communication entre les deux compartiments, jusqu'à l'isolement puis la mort.
			Dupliquer l'enveloppe nucléaire		La duplication de l'enveloppe nucléaire entraîne l'augmentation de la protection et la diminution de la communication qui peut conduire à la mort de la cellule.
			Echanger l'enveloppe nucléaire		L'échange d'enveloppe nucléaire entraîne une modification de la protection et de la communication entre les deux compartiments, ce qui peut conduire à la mort.
	Nucléoplasme		Modifier / Changer le nucléoplasme	Le nucléoplasme est le milieu liquide du noyau et qui contient toutes les informations	La modification du nucléoplasme entraîne une modification de la fonctionnalité du noyau.

			Enlever / Détruire le nucléoplasme	nécessaires à son fonctionnement.	L'absence du nucléoplasme entraîne la mort du noyau.
			Ajouter le nucléoplasme		L'ajout de nucléoplasme entraîne une augmentation de volume du noyau jusqu'à un seuil, puis la mort.
			Dupliquer le nucléoplasme		La duplication du nucléoplasme entraîne une augmentation du volume du noyau ou sa mort en fonction du volume de départ.
			Echanger le nucléoplasme		L'échange du nucléoplasme entraîne une modification du fonctionnement du noyau ou n'a aucun effet, s'il est équivalent.
	Nucléole		Modifier / Echanger le nucléole	Le nucléole est le lieu, dans le noyau, où sont formés les ARN qui donneront les protéines.	La modification du nucléole entraîne une modification de la production des protéines.
			Enlever / Détruire le nucléole		L'absence de nucléole entraîne une absence de protéine et la mort du noyau.
			Ajouter un nucléole		L'ajout d'un nucléole entraîne une modification des ARN produits.

			Dupliquer le nucléole		La duplication du nucléole entraîne une augmentation de la production des ARN.
			Echanger le nucléole		L'échange du nucléole entraîne une modification des ARN produits.
		Graphique	Deux cercles représentant une cellule et son noyau	Un noyau est contenu dans une cellule et a une forme arrondie.	
			Un cercle représentant un noyau	Un noyau a une forme arrondie.	

Niveau Caryotype

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Caryotype	Ordre des chromosomes	Texte	Modifier / Changer l'ordre des chromosomes	Un caryotype comprend un nombre prédéfini de chromosomes, identique pour tous les individus de la même espèce.	Une modification du nombre des chromosomes entraîne une modification de leur classement.
			Enlever l'ordre des chromosomes		
			Ajouter l'ordre des chromosomes		
			Dupliquer l'ordre des chromosomes.		
			Echanger l'ordre des chromosomes		

			Modifier / Changer le nombre des chromosomes		La modification d'un ou plusieurs chromosome entraine une modification de leur classement.
			Enlever /Détruire un ou plusieurs chromosomes		L'absence d'un ou plusieurs chromosomes entraîne l'apparition d'au moins un chromosome seul à la place d'une paire.
		Graphique	Ajouter un ou plusieurs chromosomes		L'ajout d'un ou plusieurs chromosomes entraîne l'apparition d'un chromosome différent de l'espèce, qui n'a pas de paire.
			Dupliquer un ou plusieurs chromosomes		La duplication d'un ou plusieurs chromosomes entraîne la présence d'un ou plusieurs triplets à la place d'une paire.
			Echanger un ou plusieurs chromosomes		L'échange d'un ou plusieurs chromosomes entraîne l'absence d'un ou plusieurs chromosomes et l'apparition d'un chromosome d'une autre espèce.

		Graphique	23 paires de chromosomes	Le caryotype humain est formé de 46 chromosomes.	
			Chromosomes en X	La forme la plus connue des chromosomes est le X.	
			Un trait représentant un chromosome	Lors de la première étape de la division cellulaire, le chromosome n'est formé que d'une chromatide, soit un seul trait.	

Niveau Chromosome

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Chromosome	Chromosome en entier	Texte	Modifier / Changer le chromosome	Un chromosome est un élément microscopique, formé d'ADN super enroulé et de protéine. Chaque chromosome contient des informations particulières. Il se trouve dans le noyau. Il existe sous deux formes, les gonosomes et les autosomes. Il est transmis des cellules mères aux cellules filles lors de la mitose ou de la méiose. Il transmet les caractères héréditaires. Il est transférable entre individus de la même espèce.	Une modification d'un chromosome entraîne une modification des informations qu'il porte.
			Enlever / Détruire le chromosome		L'absence d'un chromosome entraîne l'absence des informations qu'il porte.
			Ajouter un chromosome		L'ajout d'un chromosome entraîne l'apparition de nouvelles informations.
			Dupliquer le chromosome		La duplication d'un chromosome entraîne le doublement des informations qu'il porte.
			Echanger le chromosome		L'échange d'un chromosome entraîne l'absence d'informations et l'apparition de nouvelles, sauf s'il y a équivalence.

	Un des quatre bras du chromosome		Modifier / Changer un bras du chromosome	Un chromosome est formé de 4 bras, chaque bras contient plusieurs informations.	La modification d'un bras du chromosome entraîne la modification de plusieurs informations.
			Enlever / Détruire un bras du chromosome		L'absence d'un bras du chromosome entraîne la perte d'une ou plusieurs informations.
			Ajouter un bras d'un chromosome		L'ajout d'un bras au chromosome entraîne l'addition d'une ou plusieurs nouvelles informations.
			Dupliquer un bras du chromosome		La duplication d'un bras du chromosome entraîne l'apparition de deux informations identiques.
			Echanger un bras du chromosome		L'échange d'un bras du chromosome entraîne la perte d'informations et l'apparition de nouvelles.
	Le centromère du chromosome		Modifier / Changer le centromère du chromosome	Les deux chromatides d'un même chromosome sont rassemblées au niveau du	La modification du centromère du chromosome entraîne la modification de l'appariement des deux

			Modifier / Changer le centromère du chromosome		chromatides.
			Enlever / Détruire le centromère du chromosome		L'absence de centromère entraîne la formation de deux chromosomes à une chromatide.
	Le centromère du chromosome		Ajouter un centromère au chromosome	centromère.	
			Dupliquer le centromère du chromosome		
			Echanger le centromère du chromosome		L'échange du centromère entraine l'apparition de deux chromatides différentes, sauf s'il y a équivalence.
	Une des deux chromatides		Modifier/ Changer une des deux chromatides	Une chromatide correspond à deux bras du chromosome qui sont du même côté.	La modification d'une des deux chromatides entraîne une modification des informations qu'elle porte.
			Enlever / Détruire une des deux chromatides		L'absence d'une des deux chromatides entraîne la perte des informations qu'elle porte.

			Ajouter une chromatide		L'ajout d'une chromatide entraîne l'apparition de nouvelles informations.
			Dupliquer une des deux chromatides		La duplication d'une chromatide entraîne le doublement de l'information.
			Echanger une des deux chromatides		L'échange de deux chromatides entraîne la disparition d'informations et l'apparition de nouvelles.
		Graphique	Chromosomes en X	La forme la plus connue des chromosomes est le X.	
			Un trait représentant un chromosome	Lors de la première étape de la division cellulaire, le chromosome n'est formé que d'un chromatide, soit d'un seul trait.	

Niveau Gène

Niveau	Objet biologique	L	R	∑ 1	∑ 2
Gène	Gène	Texte	Modifier / Changer un gène	Un gène est une unité d'information qui code pour une caractéristique. Il porte le plan de fabrication d'une protéine. Il contient des parties non-codantes (les introns). Il peut être dominant, récessif ou co-dominant. C'est une unité d'information génétique transmise d'un individu à sa descendance. Il est présent sur une partie définie d'un chromosome défini. Il est transférable d'un organisme à l'autre. Il possède plusieurs variables : les allèles.	Une modification d'un gène entraîne une modification de l'information qu'il porte.
			Enlever / Détruire un gène		L'absence d'un gène entraîne la perte du caractère qu'il code.
			Ajouter un gène		L'ajout d'un gène entraîne l'apparition d'un nouveau caractère.
			Dupliquer un gène		La duplication d'un gène entraine l'apparition de deux fois le même caractère.
			Echanger un gène		L'échange d'un gène entraîne la disparition d'un caractère et l'apparition d'un nouveau.
	Promoteur du gène		Modifier / Changer le promoteur du gène	Un gène a besoin d'un promoteur spécifique pour être lu et rendre visible l'information qu'il	La modification du promoteur entraîne une modification dans la possibilité de lecture.

			Enlever / Détruire le promoteur du gène	porte.	L'absence du promoteur entraîne la non lecture du gène donc la perte du caractère.
			Ajouter un promoteur au gène		L'ajout d'un promoteur n'entraîne pas de conséquence s'il est juxtaposé à l'ancien.
			Dupliquer le promoteur du gène		La duplication du promoteur n'entraîne pas de conséquence.
			Echanger le promoteur du gène		L'échange du promoteur entraîne la perte du caractère par non lecture du gène en raison d'un promoteur non spécifique.
	Corps du gène		Modifier / Changer le corps du gène	Le corps d'un gène contient son information à proprement parlé.	La modification du corps du gène entraîne la perte du caractère.
			Enlever / Détruire le corps du gène		L'absence du corps du gène entraîne la perte du caractère.
			Ajouter un corps au gène		L'ajout du corps d'un gène entraîne la perte du caractère par l'incompatibilité entre le promoteur et le corps.

			Dupliquer le corps du gène		
			Echanger le corps du gène		L'échange du corps du gène entraîne la perte du caractère par incompatibilité entre le corps et promoteur..
	Terminaison du gène		Modifier / Changer la terminaison du gène	Un gène a besoin d'une terminaison pour indiquer que la lecture est finie.	La modification de la terminaison entraîne une modification de la lecture de l'information.
			Enlever / Détruire la terminaison du gène		L'absence de la terminaison entraine la perte du caractère par l'impossibilité de finir la lecture.
			Ajouter une terminaison au gène		L'ajout d'une terminaison n'a pas d'effet si elle est attenante à celle existante, sinon elle a le même effet que la perte.
			Dupliquer la terminaison du gène		La duplication de la terminaison n'a pas d'effet.
			Echanger la terminaison du gène		L'échange d'une terminaison entraîne la perte de l'information pour non lecture.
		Graphique	Une barre représentant un gène	Un gène est illustré par une barre qui peut être découpée en trois parties (promoteur, corps et terminaison).	

			Une marque sur un chromosome	Chaque gène est porté spécifiquement par un chromosome.	
			Un cercle représentant un gène	Un gène est délimité et est une entité différenciée.	
			Un bout d'hélice ou d'échelle	Un gène est un morceau d'ADN.	

Annexe IV : Codes pour l'analyse des productions des élèves (signification des codes et tableaux de codes pour chaque niveau)

Signification des codes et de leur valeur

Codes :

Pour chaque code, les deux premières lettres correspondent au niveau.

OG = Organisme

Og = Organe

Ce = Cellule

No = Noyau

Ca = Caryotype

Ch = Chromosome

Ge = Gène

ADN = ADN

La lettre majuscule qui vient ensuite correspond à la partie.

I = Idée

S = Schéma

L = Légende

P = Protocole

La minuscule qui fait suite décrit le terme codé.

Si c'est un verbe d'action : a.

Si c'est un support : s.

Si c'est l'élément sur lequel on va agir, qui varie : v.

Le chiffre indique s'il y en a plusieurs dans chaque catégorie.

Pour les codes au niveau du protocole, on retrouve toujours une action y au niveau X d'un élément V1 qui varie, donc le code est XPyV1.

Valeurs :

En ce qui concerne les valeurs, j'ai différencié les catégories action, support et variable avec respectivement des dizaines, des unités et des centaines.

Ainsi tous les verbes d'action sont codés avec des dizaines, de 10 à 50, les supports avec des unités : 1-5-7, et les variables avec des centaines, de 100 à 600.

Ainsi, même lorsque l'on fait la somme de chaque partie, on peut retrouver facilement le détail.

Par exemple, un élève qui obtiendra pour la partie idée organisme le score de 120, c'est qu'il pense qu'en enlevant un paramètre environnemental, il modifiera l'information génétique.

Tableaux de codes pour chaque niveau

Niveau Milieu :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	MIa1	10
	Enlever	MIa2	20
	Ajouter	MIa3	30
	Dupliquer	MIa4	40
	Echanger	MIa5	50
	Prendre	MIa6	60
	Paramètre environnemental	MIv1	100
	Milieu de vie	MIv2	200
Schéma	Forme symbolique	MSv1	100
Légende	Modifier	MLa1	10
	Enlever	MLa2	20
	Ajouter	MLa3	30
	Dupliquer	MLa4	40
	Echanger	MLa5	50
	Prendre	MLa6	60
	Organisme	MLs1	1
	Milieu	MLv2	200
	Nom d'un paramètre environnemental	MLv1	100
Protocole	Modifier un paramètre	MPa1V1	110
	Enlever un paramètre	MPa2V1	120
	Ajouter un paramètre	MPa3v1	130

	Dupliquer un paramètre	MPa4v1	140
	Echanger un paramètre	MPa5v1	150
	Prendre un paramètre	MPa6v1	160
	Prendre le milieu	MPa6v2	260
	Modifier le milieu	MPa1v2	210
	Echanger le milieu	MPa5v2	250

Niveau Organisme :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	OGIa1	10
	Enlever	OGIa2	20
	Ajouter	OGIa3	30
	Dupliquer	OGIa4	40
	Echanger	OGIa5	50
	Prendre	OGIa6	60
	Organisme	OGIv1	100
	Enveloppe de l'organisme	OGIv2	200
	Contenu de l'organisme	OGIv3	300
	Partie de l'organisme	OGIv4	400
Schéma	Cercle	OGSv11	100
	Animal ou végétal	OGSv12	200
Légende	Modifier	OGLa1	10
	Enlever	OGLa2	20
	Ajouter	OGLa3	30
	Dupliquer	OGLa4	40
	Echanger	OGLa5	50
	Prendre	OGLa6	60
	Organisme	OGLv1	100
	Nom d'animal ou de végétal	OGLv2	200
	Contenu	OGLv3	300
	Enveloppe	OGLv4	400
Protocole	Modifier l'organisme	OGPa1v1	110
	Enlever l'organisme	OGPa2V1	120

	Ajouter un organisme	OGPa3v1	130
	Dupliquer l'organisme	OGPa4v1	140
	Echanger l'organisme	OGPa5v1	150
	Prendre l'organisme	OGPa6v1	160
	Modifier l'enveloppe	OGPa1v2	210
	Enlever l'enveloppe	OGPa2v2	220
	Ajouter une enveloppe	OGPa3v2	230
	Dupliquer l'enveloppe	OGPa4v2	240
	Echanger l'enveloppe	OGPa5v2	250
	Prendre l'enveloppe	OGPa6v2	260
	Modifier le contenu	OGPa1v3	310
	Enlever le contenu	OGPa2v3	320
	Ajouter du contenu	OGPa3v3	330
	Dupliquer le contenu	OGPa4v3	340
	Echanger le contenu	OGPa5v3	350
	Prendre le contenu	OGPa6v3	360
	Prendre une partie	OGPa6v4	460
	Modifier une partie	OGPa1v4	410
	Enlever une partie	OGPa2v4	420
	Ajouter une partie	OGPa3v4	430
	Dupliquer une partie	OGPa4v4	440
	Echanger une partie	OGPa5v4	450

Niveau Organe :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	OgIa1	10
	Enlever	OgIa2	20
	Ajouter	OgIa3	30
	Dupliquer	OgIa4	40
	Echanger	OgIa5	50
	Prendre	OgIa6	60
	Organe	OgIv1	100
	Enveloppe	OgIv2	200
	Contenu d'organe	OgIv3	300
Schéma	Cercle	OgSv1	100
	Forme	OgSv2	200
Légende	Modifier	OgLa1	10
	Enlever	OgLa2	20
	Ajouter	OgLa3	30
	Dupliquer	OgLa4	40
	Echanger	OgLa5	50
	Prendre	OgLa6	60
	Organe	OgLv1	100
	Enveloppe	OgLv2	200
	Contenu d'organe	OgLv3	300
Protocole	Modifier l'organe	OgPa1v1	110
	Enlever l'organe	OgPa2v1	120
	Ajouter l'organe	OgPa3v1	130
	Dupliquer l'organe	OgPa4v1	140

	Echanger l'organe	OgPa5v1	150
	Prendre l'organe	OgPa6v1	160
	Modifier l'enveloppe	OgPa1v2	210
	Enlever l'enveloppe	OgPa2v2	220
	Ajouter l'enveloppe	OgPa3v2	230
	Dupliquer l'enveloppe	OgPa4v2	240
	Echanger l'enveloppe	OgPa5v2	250
	Prendre l'enveloppe	OgPa6v2	260
	Prendre le contenu	OgPa6v3	360
	Modifier le contenu	OgPa1v3	310
	Enlever le contenu	OgPa2v3	320
	Ajouter du contenu	OgPa3v3	330
	Dupliquer le contenu	OgPa4v3	340
	Echanger le contenu	OgPa5v3	350

Niveau Cellule :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	CeIa1	10
	Enlever	CeIa2	20
	Ajouter	CeIa3	30
	Dupliquer	CeIa4	40
	Echanger	CeIa5	50
	Prendre	CeIa6	60
	Cellule	CeIv1	100
	Contenu	CeIv2	200
	Membrane	CeIv3	300
	Constituant de membrane	CeIv4	400
	Cytoplasme	CeIv5	500
	Organite	CeIv6	600
Schéma	Cercle	CeSv1	100
	Double trait	CeSv3	300
	Forme	CeSv6	600
Légende	Modifier	CeLa1	10
	Enlever	CeLa2	20
	Ajouter	CeLa3	30
	Dupliquer	CeLa4	40
	Echanger	CeLa5	50
	Prendre	CeLa6	60
	Cellule	CeLv1	100
	Contenu	CeLv2	200
	Membrane	CeLv3	300
	Constituant de membrane	CeLv4	400
	Cytoplasme	CeLv5	500
	Organite	CeLv6	600

Protocole	Modifier la cellule	CePa1v1	110
	Enlever la cellule	CePa2v1	120
	Ajouter une cellule	CePa3v1	130
	Dupliquer la cellule	CePa4v1	140
	Echanger la cellule	CePa5v1	150
	Prendre la cellule	CePa6v1	160
	Modifier le contenu	CePa1v2	210
	Enlever le contenu	CePa2v2	220
	Ajouter du contenu	CePa3v2	230
	Dupliquer le contenu	CePa4v2	240
	Echanger le contenu	CePa5v2	250
	Prendre le contenu	CePa6v2	260
	Modifier la membrane	CePa1v3	310
	Enlever la membrane	CePa2v3	320
	Ajouter la membrane	CePa3v3	330
	Dupliquer la membrane	CePa4v3	340
	Echanger la membrane	CePa5v3	350
	Prendre la membrane	cePa6v3	360
	Modifier un constituant de la membrane	CePa1v4	410
	Enlever un constituant de la membrane	CePa2v4	420
	Ajouter un constituant de la membrane	CePa3v4	430
	Dupliquer un constituant de la membrane	CePa4V4	440
	Echanger un constituant de la membrane	CePa5V4	450
	Prendre un constituant de la membrane	CePa6v4	460

	Modifier le cytoplasme	CePa1v5	510
	Enlever le cytoplasme	CePa2v5	520
	Ajouter du cytoplasme	CePa3v5	530
	Dupliquer le cytoplasme	CePa4v5	540
	Echanger le cytoplasme	CePa5v5	550
	Prendre le cytoplasme	CePa6v5	560
	Prendre un organite	CePa6v6	660
	Modifier un organite	CePa1v6	610
	Enlever un organite	CePa2v6	620
	Ajouter un organite	CePa3v6	630
	Dupliquer un organite	CePa4v6	640
	Echanger un organite	CePa5v6	650

Niveau Noyau :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	NoIa1	10
	Enlever	NoIa2	20
	Ajouter	NoIa3	30
	Dupliquer	NoIa4	40
	Echanger	NoIa5	50
	Prendre	NoIa6	60
	Noyau	NoIv1	100
	Enveloppe	NoIv2	200
	Nucléoplasme	NoIv3	300
	Nucléole	NoIv4	400
Schéma	Un cercle	NoSv1	100
	Deux cercles	NoSv5	500
Légende	Modifier	NoLa1	10
	Enlever	NoLa2	20
	Ajouter	NoLa3	30
	Dupliquer	NoLa4	40
	Echanger	NoLa5	50
	Prendre	NoLa6	60
	Noyau	NoLv1	100
	Enveloppe	NoLv2	200
	Nucléoplasme	NoLv3	300
	Nucléole	NoLv4	400
Protocole	Modifier le noyau	NoPa1v1	110
	Enlever le noyau	NoPa2v1	120
	Ajouter un noyau	NoPa3v1	130

	Dupliquer le noyau	NoPa4v1	140
	Echanger le noyau	NoPa5v1	150
	Prendre le noyau	NoPa6v1	160
	Modifier l'enveloppe	NoPa1v2	210
	Enlever l'enveloppe	NoPa2v2	220
	Ajouter une enveloppe	NoPa3v2	230
	Dupliquer l'enveloppe	NoPa5v2	240
	Echanger l'enveloppe	NoPa4v2	250
	Prendre l'enveloppe	NoPa6v2	260
	Modifier le nucléoplasme	NoPa1v3	310
	Enlever le nucléoplasme	NoPa2v3	320
	Ajouter du nucléoplasme	NoPa3v3	330
	Dupliquer le nucléoplasme	NoPa4v3	340
	Echanger le nucléoplasme	NoPa5v3	350
	Prendre le nucléoplasme	NoPa6v3	360
	Prendre le nucléole	NoPa6v4	460
	Modifier le nucléole	NoPa1v4	410
	Enlever le nucléole	NoPa2v4	420
	Ajouter un nucléole	NoPa3v4	430
	Dupliquer le nucléole	NoPa4V4	440
	Echanger le nucléole	NoPa5v4	450

Niveau Caryotype :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	CaIa1	10
	Enlever	CaIa2	20
	Ajouter	CaIa3	30
	Dupliquer	CaIa4	40
	Echanger	CaIa5	50
	Prendre	CaIa6	60
	Caryotype	CaIs1	1
	Chromosome	CaIs2	5
	Paire de chromosome	CaIs3	7
	Nombre de chromosomes	CaIv1	100
	Ordre des chromosomes	CaIv2	200
Schéma	Caryotype de 23 paires de chromosomes	CaSs1	1
	Chromosome en croix	CaSs2	5
	Chromosome en bâton	CaSs3	7
Légende	Modifier	CaLa1	10
	Enlever	CaLa2	20
	Ajouter	CaLa3	30

	Dupliquer	CaLa4	40
	Echanger	CaLa5	50
	Prendre	CaLa6	60
	Caryotype	CaLs1	1
	Chromosome	CaLs2	5
	Paire de chromosome	CaLs3	7
	Nombre de chromosomes	CaLv1	100
	Ordre des chromosomes	CaLv2	200
Protocole	Modifier le nombre des chromosomes	CaPa1v1	110
	Enlever x chromosomes	CaPa2v1	120
	Ajouter x chromosomes	CaPa3v1	130
	Dupliquer x chromosomes	CaPa4v1	140
	Echanger x chromosomes	CaPa5v1	150
	Prendre un caryotype	CaPa6s1	61
	Modifier l'ordre des chromosomes	CaPa1v2	210
	Echanger l'ordre des chromosomes	CaPa5v2	250

Niveau Chromosome :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	ChIa1	10
	Enlever	ChIa2	20
	Ajouter	ChIa3	30
	Dupliquer	ChIa4	40
	Echanger	ChIa5	50
	Prendre	ChIa6	60
	Chromosome	ChIv1	100
	Bras	ChIv2	200
	Centromère	ChIv3	300
	Chromatide	ChIv4	400
Schéma	Chromosome en croix	ChSv1	100
	Chromosome en bâton	ChSv4	400
Légende	Modifier	ChLa1	10
	Enlever	ChLa2	20
	Ajouter	ChLa3	30
	Dupliquer	ChLa4	40
	Echanger	ChLa5	50
	Prendre	ChLa6	60
	Chromosome	ChLv1	100
	Bras	ChLv2	200
	Centromère	ChLv3	300
	Chromatide	ChLv4	400
Protocole	Modifier le chromosome	ChPa1v1	110
	Enlever le chromosome	ChPa2v1	120

	Ajouter un chromosome	ChPa3v1	130
	Dupliquer le chromosome	ChPa4v1	140
	Echanger le chromosome	ChPa5v1	150
	Prendre un chromosome	ChPa6v1	160
	Modifier un bras	ChPa1v2	210
	Enlever un bras	ChPa2v2	220
	Ajouter un bras	ChPa3v2	230
	Dupliquer un bras	ChPa4v2	240
	Echanger un bras	ChPa5v2	250
	Prendre un bras	ChPa6v2	260
	Modifier le centromère	ChPa1v3	310
	Enlever le centromère	ChPa2v3	320
	Ajouter un centromère	ChPa3v3	330
	Dupliquer le centromère	ChPa4v3	340
	Echanger le centromère	ChPa5v3	350
	Prendre un centromère	ChPa6v3	360
	Prendre une chromatide	ChPa6v4	460
	Modifier une chromatide	ChPa1v4	410
	Enlever une chromatide	ChPa2v4	420
	Ajouter une chromatide	ChPa3v4	430
	Dupliquer une chromatide	ChPa4V4	440
	Echanger une chromatide	ChPa5v4	450

Niveau Gène :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	GeIa1	10
	Enlever	GeIa2	20
	Ajouter	GeIa3	30
	Dupliquer	GeIa4	40
	Echanger	GeIa5	50
	Prendre	GeIa6	60
	Gène	GeIv1	100
	Promoteur	GeIv2	200
	Corps du gène	GeIv3	300
	Terminaison	GeIv4	400
Schéma	Barre	GeSv11	100
	Marque sur un chromosome	GeSv12	500
	Cercle	GeSv13	600
	Bout d'hélice ou d'échelle	GeSv14	700
Légende	Modifier	GeLa1	10
	Enlever	GeLa2	20
	Ajouter	GeLa3	30
	Dupliquer	GeLa4	40
	Echanger	GeLa5	50
	Prendre	GeLa6	60
	Gène	GeLv1	100
	Promoteur	GeLv2	200
	Corps de gène	GeLv3	300

	Terminaison	GeLv4	400
Protocole	Modifier le gène	GePa1v1	110
	Enlever le gène	GePa2v1	120
	Ajouter un gène	GePa3v1	130
	Dupliquer le gène	GePa4v1	140
	Echanger le gène	GePa5v1	150
	Prendre un gène	GePa6v1	160
	Modifier le promoteur	GePa1v2	210
	Enlever le promoteur	GePa2v2	220
	Ajouter un promoteur	GePa3v2	230
	Dupliquer le promoteur	GePa4v2	240
	Echanger le promoteur	GePa5v2	250
	Prendre le promoteur	GePa6v2	260
	Modifier le corps du gène	GePa1v3	310
	Enlever le corps du gène	GePa2v3	320
	Ajouter un corps au gène	GePa3v3	330
	Dupliquer le corps du gène	GePa4v3	340
	Echanger le corps du gène	GePa5v3	350
	Prendre le corps du gène	GePa6v3	360
	Prendre la terminaison	GePa6v4	460
	Modifier la terminaison	GePa1v4	410
	Enlever la terminaison	GePa2v4	420
	Ajouter la terminaison	GePa3v4	430
	Dupliquer la terminaison	GePa4V4	440
	Echanger la terminaison	GePa5v4	450

Niveau ADN :

Partie	Nom	Code	Attribut des opérateurs
Idées	Modifier	ADNIa1	10
	Enlever	ADNIa2	20
	Ajouter	ADNIa3	30
	Dupliquer	ADNIa4	40
	Echanger	ADNIa5	50
	Prendre	ADNIa6	60
	ADN	ADNIv1	100
	Nucléotide	ADNIv2	200
	Sucre	ADNIv3	300
	Phosphate	ADNIv4	400
	Brin	ADNIv5	500
	Molécule	ADNIv6	600
	Hélice	ADNIv7	700
Schéma	Traits pour les bases	ADNSv2	200
	Traits des montants d'échelle (sucres - phosphates)	ADNSv3	300
	Molécule	ADNSv6	600
	Double hélice	ADNSv7	700
	Structure avec boules et bâtons	ADNSv1	100
Légende	Modifier	ADNLa1	10
	Enlever	ADNLa2	20
	Ajouter	ADNLa3	30
	Dupliquer	ADNLa4	40
	Echanger	ADNLa5	50
	Prendre	ADNLa6	60
	ADN	ADNLv1	100
	Nucléotide	ADNLv2	200

	Sucre	ADNLv3	300
	Phosphate	ADNLv4	400
	Brin	ADNLv5	500
	Molécule	ADNLv6	600
	Hélice	ADNLv7	700
Protocole	Modifier l'ADN	ADNPa1v1	110
	Enlever l'ADN	ADNPa2v1	120
	Ajouter un ADN	ADNPa3v1	130
	Dupliquer l'ADN	ADNPa4v1	140
	Echanger l'ADN	ADNPa5v1	150
	Prendre de l'ADN	ADNPa6v1	160
	Modifier x nucléotide	ADNPa1v2	210
	Enlever x nucléotide	ADNPa2v2	220
	Ajouter x nucléotide	ADNPa3v2	230
	Dupliquer x nucléotide	ADNPa4v2	240
	Echanger x nucléotide	ADNPa5v2	250
	Prendre x nucléotide	ADNPa6v2	260
	Modifier un sucre	ADNPa1v3	310
	Enlever un sucre	ADNPa2v3	320
	Ajouter un sucre	ADNPa3v3	330
	Dupliquer un sucre	ADNPa4v3	340
	Echanger un sucre	ADNPa5v3	350
	Prendre un sucre	ADNPa6v3	360
	Modifier un phosphate	ADNPa1v4	410
	Enlever un phosphate	ADNPa2v4	420
	Ajouter un phosphate	ADNPa3v4	430

	Dupliquer un phosphate	ADNPa4V4	440
	Echanger un phosphate	ADNPa5V4	450
	Prendre un phosphate	ADNPa6v4	460
	Modifier un brin	ADNPa1v5	510
	Enlever un brin	ADNPa2v5	520
	Ajouter un brin	ADNPa3v5	530
	Dupliquer un brin	ÀDNPa4v5	540
	Echanger un brin	ADNPa5v5	550
	Prendre un brin d'ADN	ADNPa6v5	560
	Modifier la molécule	ADNPa1v6	610
	Enlever la molécule	ADNPa2V6	620
	Ajouter une molécule	ADNPa3v6	630
	Dupliquer la molécule	ADNPa4v6	640
	Echanger la molécule	ADNPa5v6	650
	Prendre une molécule d'ADN	ADNPa6v6	660
	Prendre une hélice d'ADN	ADNPa6v7	760
	Modifier l'hélice	ADNPa1v7	710
	Enlever l'hélice	ADNPa2v7	720
	Ajouter une hélice	ADNPa3v7	730
	Dupliquer l'hélice	ADNPa4v7	740
	Echanger l'hélice	ADNPa5v7	750

Annexe V : Liste des synonymes pour l'analyse

Synonymes pour les verbes d'action

Modifier :

Transformer

Changer

Muter

Agir sur

Perturber

Faire quelque chose sur

Quelque chose à effectuer sur

Enlever :

Retirer

Extraire

Séparer

Sortir

Détacher

Casser

Sectionner

Supprimer

Délétion

Vider

Couper

Ajouter :

Insérer

Recoller

Injecter

Placer

Mettre

Greffer

Rajouter

Transplanter

Repositionner

Implanter

Assembler

Réintroduire

Remettre

Transmettre

Replacer

Transférer dans

Introduire

Transfuser

Echanger :

Remplacer

Mettre à la place de

Inverser

Intervertir

Substituer

Greffer

Synonymes au niveau Milieu

Milieu :

Environnement

Synonymes au niveau Organisme

Organisme :

Être vivant

Corps humain

Personne

Individu

Nom d'animal ou de végétal

Embryon

Être humain

Être

Corps

Cobaye humain

Quelqu'un

Mère

Père

Synonymes au niveau Cellule

Cellule :

Cellule œuf

Cellule mère

Ovule

Spermatozoïde

Gamète

Contenu cellulaire :

Ce qu'il y a dedans

Synonymes au niveau Chromosome

Chromatide :

Deux parties du chromosome

Bras :

Bout

Synonymes au niveau Gène

Gène :

Allèle

Yeux bleus – bruns – verts …

Synonymes au niveau ADN

Séquence de nucléotides :

X nucléotides

Nucléotides :

Particules

Bases

Petites barres

Barreaux d'échelle

Brin :

Branche