

Analyse didactique de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 pour envisager sa restructuration

David Lafarge

▶ **To cite this version:**

David Lafarge. Analyse didactique de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 pour envisager sa restructuration. Education. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2010. Français. NNT : 2010CLF20015 . tel-00578419v2

HAL Id: tel-00578419

https://theses.hal.science/tel-00578419v2

Submitted on 13 Feb 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.

CLERMONT UNIVERSITE – UNIVERSITE BLAISE PASCAL

UFR de Psychologie, Sciences Sociales et Sciences de l'Éducation

École Doctorale des Lettres, Sciences Humaines et Sociales (ED 370)

THESE DE DOCTORAT

Didactique des Sciences Physiques et Chimiques

Analyse didactique de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 pour envisager sa restructuration

Présentée et soutenue publiquement à Clermont-Ferrand le 10 décembre 2010 par

David Lafarge

Laboratoire PAEDI (EA n°4281) – Clermont Université

Composition du jury

Alain DUMON, *Rapporteur et Président*
Professeur des Universités Émérite, *Chimie (31ème),* Université Montesquieu - Bordeaux IV

Marielle LEMAIRE, *Examinatrice*
Professeure des Universités, *Chimie (32ème),* Clermont Université – Université Blaise Pascal

Martine MEHEUT, *Directrice de thèse*
Professeure des Universités Émérite, *Sciences de l'éducation (70ème), Université Paris-Est Créteil*

Ludovic MORGE, *Directeur de thèse*
Maître de Conférences (28ème), HDR *Sciences de l'éducation (70ème) Clermont Université – UBP*

Georgios TSAPARLIS, *Rapporteur*
Professeur des Universités, *Didactique des sciences, Université de Ioannina (Grèce)*

Michel VIGNERON, *Examinateur*
IA-IPR de l'Éducation Nationale, *Sciences physiques et chimiques*, *Académie de Versailles*

A mes parents
Marie-T. et Philippe

Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail et à leur exprimer ma profonde reconnaissance.

J'adresse en premier lieu de nombreux remerciements à Mme Martine Méheut et à M. Ludovic Morge, qui ont dirigé ce travail et qui m'ont permis de le mener à son terme. Chacun d'eux a su combiner la rigueur, l'expertise et les qualités humaines indispensables pour me permettre de relever ce défi.

Je remercie profondément M. Alain Dumon et M. Georgios Tsaparlis qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse. Ils ont eu une influence sur le développement de ce travail à travers leurs conseils, leur aide ou plus généralement leurs apports à la didactique de la chimie.

Mes remerciements vont aussi à Mme Marielle Lemaire et M. Michel Vigneron qui ont accepté de faire partie du jury de thèse. Les échanges que nous avons eus depuis plusieurs années ont assurément contribué à enrichir ma réflexion personnelle sur l'enseignement de la chimie.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Roland Goigoux. Pour l'anecdote il fut au départ mon directeur de thèse clermontois pour des raisons administratives, mais son rôle dans ce travail est allé bien au-delà.

Il est évident que ce travail n'aurait pas pu aboutir sans la participation d'un groupe d'enseignants de la chimie en BTS, CPGE et Université. Ils ont bien voulu se prêter à mes expérimentations en m'offrant leur temps, leurs réflexions et leur expertise. Je les en remercie très sincèrement.

Je remercie les membres du laboratoire PAEDI, mes collègues (enseignants ou non), les membres de l'ARDIST, et tous ceux qui dans mon environnement professionnel ont su m'apporter leur aide et leur soutien.

Enfin, une phrase n'est que peu de chose pour remercier mes proches, mes amis, ma famille pour leur soutien sans faille, leur patience et leur tolérance lors de mes sessions d'isolement studieux ou mes coups de stress. Comment aurais-je pu réussir cela sans vous ? Merci un million de fois !

Thèse réalisée avec le soutien de :

L'Institut National de Recherche Pédagogique

L'École Doctorale Lettres, Sciences Humaines et Sociales (ED 370)

La Mission Recherche de l'IUFM d'Auvergne

Le laboratoire PAEDI (EA n°4281)

Sommaire

Tome 1 : Compte-rendu de la recherche

INTRODUCTION 1

PARTIE I OBJET ET CADRE DE LA RECHERCHE 3

CHAPITRE I-1 L'ENSEIGNEMENT ET L'APPRENTISSAGE DE LA CHIMIE ORGANIQUE 4
CHAPITRE I-2 PROBLÉMATIQUE ET PLAN D'ÉTUDE 25

PARTIE II LE SAVOIR À ENSEIGNER JUSQU'À BAC+2 : ANALYSE ET PROPOSITIONS 29

CHAPITRE II-1 CADRE DE L'ANALYSE DU SAVOIR À ENSEIGNER 30
CHAPITRE II-2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU SAVOIR À ENSEIGNER 44
CHAPITRE II-3 PROPOSITIONS POUR AMÉLIORER CET ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE 74

PARTIE III ÉTUDE EXPLORATOIRE DE L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS 81

CHAPITRE III-1 CADRE : ANALYSER L'ACTIVITÉ D'UN ENSEIGNANT 82
CHAPITRE III-2 RÉSULTATS : PREMIERS ÉLÉMENTS DE COMPRÉHENSION DE L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS 93

PARTIE IV CONCEPTION D'UN INSTRUMENT DIDACTIQUE POUR LES ENSEIGNANTS 107

CHAPITRE IV-1 CADRE DE CONCEPTION ET ACTIVITÉ INSTRUMENTÉE DES ENSEIGNANTS 108
CHAPITRE IV-2 RÉSULTAT DE LA CONCEPTION D'UN PREMIER ARTEFACT POUR LES ENSEIGNANTS 121
CHAPITRE IV-3 RÉSULTATS D'ANALYSE DE L'ACTIVITÉ INSTRUMENTÉE DES ENSEIGNANTS 147

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 180

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 185

Tome 2 : Annexes

Artefact et autres annexes (CD-ROM)

Table des matières

Tome 1 : Compte-rendu de la recherche

INTRODUCTION 1

PARTIE I OBJET ET CADRE DE LA RECHERCHE 3

CHAPITRE I-1 L'ENSEIGNEMENT ET L'APPRENTISSAGE DE LA CHIMIE ORGANIQUE 4

1. LA CHIMIE ORGANIQUE POSE UN PROBLÈME D'ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE 4
   - 1.1. « J'aime pas la chimie orga » : un cours « traumatisant » 4
   - 1.2. Un apprentissage difficile 5
     - *1.2.1. Un gros effort de mémorisation* *5*
     - *1.2.2. Des difficultés conceptuelles* *7*

2. LES ENSEIGNANTS ET LES DIDACTICIENS PROPOSENT PLUSIEURS EXPLICATIONS 8
   - 2.1. Un important volume de connaissances à traiter en peu de temps 8
   - 2.2. Un symbolisme ambigu 9
   - 2.3. Un savoir complexe 14

3. DES AMÉLIORATIONS SONT DEVENUES NÉCESSAIRES 16
   - 3.1. Des améliorations dans la mise en œuvre de cet enseignement 16
   - 3.2. Une redéfinition du contenu disciplinaire lui-même 18

4. MAIS L'ENSEIGNANT N'AURAIT PAS UNE MARGE DE MANŒUVRE SUFFISANTE 23

CHAPITRE I-2 PROBLÉMATIQUE ET PLAN D'ÉTUDE 25

1. PROBLÉMATIQUE 25
   - 1.1. L'apprentissage de la chimie organique et la structuration du contenu 25
   - 1.2. L'activité des enseignants en chimie organique : la comprendre et leur permettre de la modifier 26

2. PLAN D'ÉTUDE 27
   - 2.1. Une analyse du savoir à enseigner puis des propositions (partie II) 27
   - 2.2. Une étude exploratoire de l'activité d'enseignants de chimie organique (partie III) 28
   - 2.3. La conception d'un instrument didactique et l'analyse de l'activité instrumentée d'enseignants (partie IV) 28

PARTIE II LE SAVOIR À ENSEIGNER JUSQU'À BAC+2 : ANALYSE ET PROPOSITIONS 29

CHAPITRE II-1 CADRE DE L'ANALYSE DU SAVOIR À ENSEIGNER 30

1. CADRE THÉORIQUE : COMMENT ÉVALUER L'EFFICACITÉ D'UN MODÈLE ? 30
   - 1.1. Un modèle doit être simple mais exhaustif 30
   - 1.2. Un modèle doit être pertinent pour certaines tâches dans des situations données 33

2. LES ÉTUDIANTS PEUVENT-ILS RAISONNER PLUTÔT QUE MÉMORISER-RESTITUER ? QUESTION ET HYPOTHÈSE DE RECHERCHE 36

3. MÉTHODOLOGIE 37
   - 3.1. Un corpus représentatif des connaissances et compétences à acquérir (du bac à bac+2) 37
     - *3.1.1. Programmes d'enseignement* *37*
     - *3.1.2. Énoncés d'examens et de concours* *38*

3.1.3. Livres de chimie organique du niveau enseigné *38*
3.2. Lignes d'analyse du corpus 38
3.2.1. Décrire les tâches soumises aux étudiants lors d'examens et de concours *39*
3.2.3. Caractériser la structuration globale du savoir à enseigner et en analyser la pertinence *43*

CHAPITRE II-2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU SAVOIR À ENSEIGNER 44

1. LES PRINCIPAUX OBJECTIFS AFFICHÉS DANS LES PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT 44

2. LES TÂCHES SOUMISES AUX ÉTUDIANTS LORS DES EXAMENS ET DES CONCOURS 47
2.1. Description des tâches en fonction de leurs buts et des conditions de leur résolution 47
2.1.1. Tâches de type I : proposer des réactifs ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible *48*
2.1.2. Tâches de types I' : autres tâches dont le but concerne l'état initial et les réactifs *50*
2.1.3. Tâches de type II : proposer des éléments d'un mécanisme réactionnel *52*
2.1.4. Tâches de types II' : autres tâches concernant les réactions *54*
2.1.5. Tâches de type III : déterminer la formule d'une espèce chimique synthétisée *56*
2.1.6. Tâches de type III' : autres tâches dont le but concerne l'état final ou les produits *57*
2.2. Présence de données utiles à la modélisation 57
2.3. Synthèse des principaux résultats 59

3. ANALYSE A PRIORI DES STRATÉGIES DE RÉALISATION DES TÂCHES 60
3.1. La stratégie de modélisation 60
3.1.1. Modèles de la réactivité et mécanismes réactionnels *60*
3.1.2. Cette stratégie ne permet pas de réussir dans les conditions fixées *64*
3.2. La stratégie de mémorisation-restitution 65
3.2.1. Reconnaître une fonction et restituer une réaction ou un mécanisme générique *65*
3.2.2. Cette stratégie peut permettre de réussir malgré un coût cognitif assez important *66*
3.3. Des stratégies a priori aux procédures effectives 68

4. LA STRUCTURATION GLOBALE DU SAVOIR À ENSEIGNER ET SA PERTINENCE 69
4.1. Omniprésence de la structuration par fonction 69
4.2. Pertinence de la structuration par fonction 71
4.2.1. Une structuration en adéquation avec les stratégies de mémorisation-restitution *71*
4.2.2. Mais une structuration qui n'est pas progressive par rapport aux modèles *72*

CHAPITRE II-3 PROPOSITIONS POUR AMÉLIORER CET ENSEIGNEMENT-APPRENTISSAGE 74

1. RESTRUCTURER GLOBALEMENT LE CONTENU 75
1.1. Mettre l'accent sur les questions du chimiste organicien contemporain 75
1.2. Proposer une progressivité dans les réponses et la modélisation 76

2. FAVORISER LA STRATÉGIE DE MODÉLISATION 76
2.1. Proposer des tâches (buts/conditions) permettant la modélisation 77
2.2. Rendre plus opératoires les modèles enseignés 77

3. DIVERSIFIER LES TÂCHES DE SYNTHÈSE ORGANIQUE 77
3.1. Enseigner la synthèse organique dès les premières années de chimie organique 77
3.2. Circonscrire le nombre de réactions à connaître 78
3.3. Utiliser une base de données : la « réactiothèque » 79

PARTIE III ÉTUDE EXPLORATOIRE DE L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS 81

CHAPITRE III-1 CADRE : ANALYSER L'ACTIVITÉ D'UN ENSEIGNANT 82

1. CADRE THÉORIQUE 82
1.1. Du travail prescrit au travail réel des enseignants 82
1.1.1. Transformations d'intentions didactiques par les enseignants *82*
1.1.2. La redéfinition de la prescription par les enseignants *83*
1.1.3. Le rôle du genre professionnel *83*
1.2. Un modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant 84
1.2.1. L'activité du professeur est multifinalisée *84*
1.2.2. L'activité du professeur est multidéterminée *85*
1.2.3. Schématisation du modèle d'analyse *85*
1.3. Les PCK 86
1.3.1. Des connaissances professionnelles liées au contenu à enseigner *86*

1.3.2. La diversité des PCK *87*
1.3.3. Le développement de PCK *87*

2. COMMENT INTERPRÉTER L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS ? QUESTION ET HYPOTHÈSE DE RECHERCHE 88

3. MÉTHODOLOGIE 89
3.1. Le corpus : des pratiques déclarées 89
3.1.1. Réalisation d'entretiens et de leur transcription *89*
3.1.2. Le guide d'entretien *90*
3.2. Lignes d'analyse du corpus 91

CHAPITRE III-2 RÉSULTATS : PREMIERS ÉLÉMENTS DE COMPRÉHENSION DE L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS 93

1. LA STRUCTURATION GLOBALE DES CONTENUS 93
1.1. Une structuration des contenus répandue : les principaux outils théoriques puis les grandes familles 93
1.2. Des contraintes « institutionnelles » favoriseraient cette structuration 94
1.3. Cette structuration aurait des avantages pour les étudiants 96
1.4. Cette structuration aurait aussi des inconvénients pour les étudiants 97
1.5. Les propositions d'autres structurations semblent trop difficiles à mettre en œuvre 97

2. LA SYNTHÈSE ORGANIQUE 99
2.1. La conception de synthèses organiques semble quasiment impossible jusqu'à bac+2 99
2.2. Des avis partagés sur la « réactiothèque » 100
2.3. Comment valider une synthèse organique proposée par un étudiant ? 101

3. LES MÉCANISMES RÉACTIONNELS 101
3.1. Le mécanisme réactionnel ou comment l'enseignant raconte une histoire… 101
3.2. La construction d'un mécanisme réactionnel par les étudiants est jugée difficile 103
3.3. La construction des mécanismes nécessite des ressources supplémentaires pour l'enseignant 104

4. CONCLUSION : LES POSSIBILITÉS DE DÉVELOPPEMENT DE L'ACTIVITÉ DES ENSEIGNANTS 105

PARTIE IV CONCEPTION D'UN INSTRUMENT DIDACTIQUE POUR LES ENSEIGNANTS 107

CHAPITRE IV-1 CADRE DE CONCEPTION ET ACTIVITÉ INSTRUMENTÉE DES ENSEIGNANTS 108

1. CADRE THÉORIQUE 108
1.1. Une reconstruction didactique 108
1.1.1. Des analyses préalables diversifiées *108*
1.1.2. Conception de séquences d'enseignement-apprentissage *109*
1.2. L'enseignement, une activité médiatisée par les instruments 111
1.2.1. L'instrument didactique est au cœur du losange didactique *111*
1.2.2. L'instrument est un artefact associé à l'usage qui en est fait *113*
1.2.3. Le développement de l'enseignant lors de la genèse instrumentale *114*
1.2.4. La conception continuée dans l'usage de l'artefact *114*

2. QUELS EFFETS DE LA GENÈSE INSTRUMENTALE ? QUESTION DE RECHERCHE 116

3. MÉTHODOLOGIE 116
3.1. Conception d'un premier artefact 116
3.2. Premières utilisations de l'artefact par des enseignants 117
3.2.1. Corpus préliminaire : questionnaire « premières impressions » *117*
3.2.2. Corpus principal : enregistrement et transcription d'une simulation de préparation de cours avec l'artefact *118*
3.2.3. Lignes d'analyse des corpus *120*

CHAPITRE IV-2 RÉSULTAT DE LA CONCEPTION D'UN PREMIER ARTEFACT POUR LES ENSEIGNANTS 121

1. L'INTRODUCTION ET LE SOMMAIRE 121

2. L'ARGUMENTAIRE INITIAL : POURQUOI UNE APPROCHE ALTERNATIVE ? 122
2.1. Une entrée par les difficultés d'apprentissage des étudiants 122
2.2. L'origine de la structuration par famille et ses conséquences 122
2.3. Les fondements et les axes de la reconstruction de cet enseignement 123

3. UN EXEMPLE DE PROGRESSION SUR DEUX ANS 124

3.1. Des questions portent la structure d'ensemble 124
3.2. La synthèse organique et les mécanismes réactionnels sont enseignés par approfondissement successifs 125
3.2.1. Partie 1 : Comment séparer et identifier des espèces chimiques organiques ? Relations structures – propriétés physiques 125
3.2.2. Partie 2 : Qu'est-ce qu'une stratégie de synthèse organique ? 126
3.2.3. Partie 3 : Que se passe-t-il pendant une réaction de chimie organique ? Notion de mécanisme réactionnel 126
3.2.4. Partie 4 : Comment concevoir une stratégie de synthèse organique ? Notions de rétrosynthèse et de chimiosélectivité 127
3.2.5. Partie 5 : Comment prévoir et modifier l'efficacité d'une transformation d'espèce chimique ? Approches thermodynamique et cinétique 127
3.2.6. Partie 6 : Comment contrôler la stéréochimie d'une transformation d'espèce chimique ? Notions de stéréosélectivité et stéréospécificité 128
3.3. L'affichage des apprentissages visés et réinvestis renforce le maillage conceptuel de la progression 131
3.4. L'enseignement des réactions elles-mêmes passe au second plan 131
3.5. L'enseignement de la modélisation est mis en perspective 131
3.6. Le symbolisme est explicitement un objet d'enseignement 132

4. DEUX EXEMPLES DE SÉQUENCES INTRODUISANT LA SYNTHÈSE ORGANIQUE 132
4.1. Exemple de séquence n°1 – Une synthèse de la juvabione 133
4.1.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence 133
4.1.2. Description des tâches principales et des documents associés 133
4.1.3. Évaluation finale de la séquence : deux synthèses du grandisol 135
4.2. Exemple de séquence n°2 – Conception de synthèses organiques simples 136
4.2.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence 136
4.2.2. Description des tâches principales et des documents associés (la réactiothèque) 136
4.2.3. Évaluation finale de la séquence : synthèse d'une napthoquinone 138

5. DEUX EXEMPLES DE SÉQUENCES INTRODUISANT LES MÉCANISMES RÉACTIONNELS 138
5.1. Exemple de séquence n°3 – Un mécanisme réactionnel de l'hydrolyse basique des esters 139
5.1.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence 139
5.1.2. Description des tâches principales et des documents associés 139
5.1.3. Évaluation finale de la séquence : mécanisme d'hydrolyse d'une lactone 143
5.2. Exemples de séquence n°4 – Prévision de quelques réactions chimiques 143
5.2.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence 143
5.2.2. Description des tâches principales 144
5.2.3. Évaluation finale de la séquence 145

6. DES RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES EN ANNEXE 145
6.1. Les références bibliographiques 145
6.2. Des articles de chimie organique (synthèses organiques, mécanismes) 146
6.3. Deux articles sur l'enseignement de la synthèse organique et des mécanismes réactionnels 146

CHAPITRE IV-3 RÉSULTATS D'ANALYSE DE L'ACTIVITÉ INSTRUMENTÉE DES ENSEIGNANTS 147

1. LA GENÈSE INSTRUMENTALE POUR LE BINÔME CATHY & NOËL (CPGE BCPST) 147
1.1. Les « premières impressions » 147
1.1.1. Cathy : trop difficile tant sur le fond que sur la forme 147
1.1.2. Noël : une argumentation convaincante et poussant à la réflexion sur cet enseignement 148
1.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation 148
1.2.1. Le détournement et le test en classe par Cathy d'une séquence de synthèse organique 149
1.2.2. Les problèmes liés aux expériences de marquage isotopique 151

2. LA GENÈSE INSTRUMENTALE POUR LE BINÔME DANIELLE ET KRISTIAN (UNIVERSITÉ) 153
2.1. Les « premières impressions » 153
2.1.1. Danielle : une approche intéressante mais peu réaliste 154
2.1.2. Kristian : une approche intéressante des concepts via la synthèse mais une mise en œuvre à revoir 154
2.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation 155
2.2.1. Des problèmes de définitions 156
2.2.2. La construction d'une progressivité pour introduire les concepts et le symbolisme 158

3. LA GENÈSE INSTRUMENTALE POUR LE BINÔME GAËLLE & HÉLÈNE (STS CHIMISTE) 160
3.1. Les « premières impressions » 160
3.1.1. Gaëlle : une approche intéressante mais nécessitant une refonte des cours, programme et examens 161
3.1.2. Hélène : des envies de réinvestir malgré un document dense qu'il est difficile de s'approprier 161
3.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation 162
3.2.1. Une reconstruction de la progression difficile mais concluante 163
3.2.2. Une réutilisation quasi intégrale des séquences sur la synthèse organique et de la réactiothèque 167

3.2.3. Quelques initiatives en matière de modélisation *169*

4. LA GENÈSE INSTRUMENTALE POUR LE BINÔME MURIEL & FRANCK (STS CHIMISTE) 169
   4.1. Les « premières impressions » 169
      4.1.1. Muriel : une approche intéressante mais difficile à mettre en œuvre *170*
      4.1.2. Franck : une réforme ambitieuse dont la mise en œuvre nécessite plus de détails *170*
   4.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation 170
      4.2.1. Deux approches opposées des mécanismes réactionnels et de leur enseignement *171*
      4.2.2. Deux visions différentes des étudiants *174*
      4.2.3. Deux lectures différentes des contraintes *175*

5. CONCLUSION : QUELQUES CONSÉQUENCES POUR LA CONCEPTION DU PROCHAIN ARTEFACT 177

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 180

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 185

Tome 2 : Annexes

Artefact : « Une introduction alternative à la chimie organique » - *Version 1.0 du 02/06/09.*

Autres annexes (CD-ROM).

Introduction

Nous présentons ici notre travail de recherche mené depuis fin 2005 et qui a pour objet l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique lors des deux premières années de l'enseignement supérieur français (toutes filières confondues).

Il semble exister un malaise dans l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique : une discipline reconnue comme difficile, des démarches d'enseignement dogmatiques et cumulatives, des étudiants qui mémorisent plus qu'ils ne comprennent et qui ont du mal à mettre en relation les différents éléments théoriques, une utilisation problématique du symbolisme, et une certaine insatisfaction des enseignants (Agrebi, 2004 ; Bhattacharyya & Bodner, 2005 ; Bowen, 1990 ; Ferguson & Bodner, 2008 ; Ladhams Zieba, 2004 ; Loumouamou, 1998).

Notre principale hypothèse est que la structuration actuelle de cet enseignement ne permet pas aux étudiants de gérer efficacement la complexité de cette discipline. Ceci expliquerait pour partie leurs difficultés et pourquoi ils privilégient la mémorisation à l'utilisation de raisonnements fondés sur les modèles de la chimie organique. Notre projet est orienté selon deux approches complémentaires : d'une part nous décidons de conserver le même contenu disciplinaire, mais d'en modifier la structuration et de proposer aux étudiants des activités qui se rapprocheraient des pratiques du chimiste organicien (modélisation de la matière et de ses transformations, stratégie de synthèse de molécules organiques) ; d'autre part nous choisissons d'intégrer les enseignants au processus de conception d'un instrument didactique visant à leur fournir des ressources nécessaires à la transformation du contenu disciplinaire.

Dans la première partie, nous présentons l'objet et le cadre de notre recherche. Le chapitre I-1 nous permet de dresser l'état des connaissances disponibles dans la littérature sur l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique : les problèmes, les interprétations et les propositions d'amélioration. Nous présentons ensuite notre problématique et notre plan d'étude qui organisent le reste de ce compte-rendu (chapitre II-2).

La seconde partie est entièrement consacrée au savoir à enseigner lors des deux premières années de l'enseignement supérieur français. Nous exposons d'abord le cadrage

de cette partie : cadre théorique, question de recherche et méthodologie (chapitre II-1). Cette partie concerne les modèles scientifiques : leurs caractéristiques (Sinaceur, 1999 ; Walliser, 1977 ; Autain Kermen, 2007; Bachelard, 1979), leur enseignement (Martinand, 2002, Lemeignan & Weil-Barais, 1993), ainsi que leur rapport aux tâches soumises aux étudiants (Leplat & Hoc, 1992). Il s'agit pour nous de savoir si les étudiants peuvent raisonner en utilisant les modèles plutôt que mémoriser-restituer. Le chapitre II-2 présente les résultats de notre analyse du savoir à enseigner jusqu'à bac+2 (énoncés d'examens et de concours, programmes d'enseignement et livres de chimie organique) éclairée par des éléments du savoir de référence (publications et livres de niveau supérieur à bac+2). Cela nous amène à plusieurs propositions didactiques (chapitre II-3) telles qu'une restructuration globale des contenus par modélisation croissante (au lieu d'une structuration par fonction), l'utilisation d'une base de données (« réactiothèque ») ou la mise en œuvre d'enseignements visant la synthèse organique ou la modélisation.

La troisième partie de ce travail est une étude exploratoire de l'activité des enseignants de chimie organique. Le chapitre III-1 expose nos cadre d'analyse, question de recherche et méthodologie. Nous décidons d'analyser l'activité des enseignants en associant psychologie ergonomique (Goigoux, 2007 ; Clot & Faïta, 2000) et PCK (Shulman, 1987 ; De Jong, 2003 ; Morge, 2003 ; Van Driel *et al.*, 2004). Il s'agit pour nous d'interpréter l'activité des enseignants de chimie organique par rapport à la structuration globale des contenus, l'enseignement de la synthèse organique et l'enseignement des modèles et des mécanismes réactionnels. Le chapitre III-2 présente nos principaux résultats d'analyse de la pratique déclarée de 9 enseignants de chimie organique (CPGE, STS et Université). Et nous concluons sur les possibilités de développement de l'activité des enseignants.

Enfin la quatrième partie concerne la conception d'un instrument didactique intégrant les propositions et réflexions précédentes. Le chapitre IV-1 expose nos cadre théorique, question et méthodologie. Nous choisissons d'associer des éléments de la conception didactique (Artigue, 1988 ; Duit, 2007; Méheut & Psillos, 2004) à ceux de la conception instrumentale (Rabardel, 1995 ; Courally, 2007). L'intérêt de l'approche instrumentale est de nous permettre d'obtenir des connaissances supplémentaires sur l'activité des enseignants de chimie organique, tout en envisageant le développement ultérieur de l'instrument. Nous présentons le résultat de la conception et les choix que nous avons faits (chapitre IV-2 et l'artefact en annexe). Enfin nous présentons l'activité instrumentée d'enseignants lors d'une simulation de préparation de cours.

Partie I

Objet et cadre de la recherche

Chapitre I-1 \ L'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique
Chapitre I-2 \ Problématique et plan d'étude

Chapitre I-1

L'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique

Ce premier chapitre présente les principaux éléments bibliographiques disponibles sur l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique. Nous nous focalisons sur le cours de chimie organique des deux premières années universitaires.

1. La chimie organique pose un problème d'enseignement-apprentissage

1.1. « J'aime pas la chimie orga » : un cours « traumatisant »

Que pensez-vous de la chimie organique ? Voici un petit test très révélateur à réaliser auprès d'étudiants ou anciens étudiants scientifiques. Il n'est pas rare d'entendre qu'ils n'aiment pas la « chimie orga » car il s'agit d'un cours pénible avec énormément de choses à apprendre par cœur. Ce déficit d'image explique sans doute pourquoi la chimie organique est la victime de productions humoristiques telles que celle décrite à la figure ✦1.

Le malaise est suffisamment profond pour que se soit tenu en 1978 un colloque visant à réduire le « traumatisme » causé par cet enseignement (Libby, 1991, p.637). D'autres colloques ont eu lieu depuis aux États-Unis afin de trouver comment accroître la motivation des étudiants, améliorer la gestion d'un contenu chargé en peu de temps, ou encore lutter contre les difficultés des étudiants qui pensent à tort qu'il s'agit de mémoriser un grand nombre de phénomènes non liés entre eux (Kingsbury, 1986 ; Kingsbury & Schelble, 2001).

Le problème semble donc encore d'actualité et suffisamment répandu puisqu'il touche aussi les étudiants d'universités américaines particulièrement sélectives (Bradley *et al.*, 2002).

> *« Although Princeton is a highly selective university, the organic course seems to share the usual problems peculiar to the organic course everywhere: a certain reputation as being a killer, hyper-anxiety and over-competitiveness on the part of some of the students, and a stubborn refusal on the part of many students to believe that any attempt to deal with this course by memorization would ultimately be fatal. »*
>
> *Bradley et al., 2002, p.514*

FIGURE ✦ 1 **Extraits du clip vidéo « J'aime pas chimie orga »**



« Moi j'aime pas chimie orga,
Et pourtant il faut toujours que j'apprenne
Toutes ces réactions-là !!
Et depuis j'en ai perdu le sommeil !
[…]
Je vois les autres
Qui peu à peu piquent du nez
C'est pas ma faute à moi !
Si j'entends tout autour de moi
« J'aime pas chimie orga ! »
Ça marche pas !!!
[…]
C'est pas ta faute
Si la chimie ne te veut pas
Va voir les autres
Vous êtes des milliers dans ce cas !
C'est pas ta faute à toi !
A ta place je baisserais les bras…
[…]
Mon orga !!
J'aime pas ça !!!
Mon orga !!
M'en parle pas !!!
[…] »

FIGURE ✦1
Des étudiants ingénieurs chimistes d'une école française réputée ont créé et mis en ligne un clip vidéo affichant leurs difficultés avec la chimie organique. Les extraits ont été tirés de http://fr.youtube.com/watch?v=1ITrcZ-0kw0 (*le 14 août 2008).*

1.2. Un apprentissage difficile

1.2.1. Un gros effort de mémorisation

Nous avons relevé précédemment la présence de deux caractéristiques de cet apprentissage : la difficulté et surtout l'effort de mémorisation.

Une partie préliminaire du travail de thèse de Loumouamou (1998) porte sur la représentation de la chimie organique chez des auteurs de livres de chimie organique (N=13 de 1958 à 1995), des enseignants (N=26 en CPGE et Université) et des étudiants (N=394 en CPGE et Université jusqu'à bac+4). Une majorité d'enseignants et d'étudiants considèrent que la chimie organique peut être qualifiée de « difficile » (Loumouamou, 1998), ce qui constitue un aspect du déficit d'image dont elle souffre. Même si les auteurs de livres affirment que la chimie organique est mal perçue par les étudiants, ces derniers la considèrent malgré tout comme intéressante (Loumouamou, 1998).

Un autre décalage existe entre étudiants et enseignants. Loumouamou (1998) interroge aussi les enseignants et les étudiants sur la nature des capacités cognitives nécessaires pour réussir en chimie organique. Pour les enseignants il s'agit avant tout de « comprendre », « raisonner » et « structurer », c'est-à-dire des capacités d'un certain niveau cognitif car la chimie organique doit être pensée et raisonnée. Cependant si les étudiants classent aussi la capacité « comprendre » au premier rang, celle-ci est suivie par « apprendre » et « mémoriser ». Pour les étudiants cette discipline nécessite un effort de mémorisation important. Des entretiens avec 14 étudiants confirment cette caractéristique. Les auteurs de livres de chimie organique dénoncent aussi un apprentissage des étudiants faisant appel exclusivement à la mémoire (Loumouamou, 1998).

D'après Loumouamou (1998) il semble donc plus efficace pour les étudiants de se réfugier dans la mémorisation pour réussir en chimie organique plutôt que de mettre en relation les différents concepts sous-jacents. Ainsi pour Barlet *et al.* (1999, p.26) *« les étudiants qui se trouvent confrontés aux nécessités d'une approche globale et systémique des mécanismes réactionnels à partir d'un apprentissage souvent très cloisonné, se « perdent » dans les différents paramètres directeurs. Ils sont ainsi souvent convaincus que l'enseignant donne une réponse de circonstance et que les mécanismes n'ont que l'apparence de la rigueur. Ils sont alors enclins à privilégier la mémoire au détriment de la réflexion et de l'analyse critique».* Les deux propos d'étudiants cités ci-dessous et la figure ✦2 illustrent cette analyse.

> *« [La chimie organique] est sans doute passionnante, mais il faudrait la comprendre. Je la pense logique, mais je ne la trouve pas logique. Effectivement, à l'oral, le prof nous a montré qu'elle était logique. Mais moi, je ne la trouve pas ainsi. On ne sait pas souvent quels concepts choisir. »*
>
> *Sophie (Loumouamou, 1998, p. 318)*

> *« En chimie organique on fait beaucoup plus appel à la mémoire. Il y a toujours des concepts qui sont en contradiction, au même pied d'égalité, et lorsqu'il faut choisir on a l'impression de jouer à pile ou face. »*
>
> *Delphine (Loumouamou, 1998, p. 318)*

FIGURE ✦ 2 **Les préceptes du chimiste pris au dépourvu**

Lorsqu'un phénomène chimique reste inexpliqué, pensez à invoquer :
- L'encombrement stérique
- La cinétique lente
- La tautomérie céto-énolique
- Les Formes Mésomères (tellement utiles qu'elles sont majusculées)
- Le carbocation allylique
- L'Azobisisobutyronitrile (tellement inutile de le connaitre qu'il est majusculé aussi)
- Les liaisons Hydrogène intra-moléculaires
- Le retour de l'Aromaticité
- Le postulat de Hammond
- La chromatographie chirale (vue par Regis)
- La planéité du benzène
- Dieu joue aux dés !

(liste non limitative).

FIGURE ✦2
Cette liste est extraite de la désencylopédie disponible sur Internet http://desencyclopedie.wikia.com/wiki/Chimie (le 14 aout 2008). Elle exprime avec humour que le chimiste organicien semblerait utiliser aléatoirement des réponses de circonstance quand il est face à un problème.

Notre attention est donc particulièrement attirée par l'existence de ce décalage entre les enseignants pour lesquels la chimie organique doit être raisonnée et les étudiants pour lesquels elle doit être mémorisée.

1.2.2. Des difficultés conceptuelles

Les étudiants présentent des conceptions erronées et des difficultés liées à certains concepts, tels que les relations entre structure électronique et propriétés des espèces chimiques organiques (Henderleiter *et al.*, 2001 ; Hassan *et al.*, 2004 ; Hodges & Harvey,

2003 ; Kind, 2004 ; Taagepera & Noori, 2000). Rushton *et al.* (2008) montrent que ces conceptions sont persistantes même après plusieurs années d'enseignement. En outre les étudiants n'ont qu'une connaissance superficielle des concepts et des modèles de la chimie organique ce qui empêche leur transfert vers de nouveaux problèmes à résoudre (Bhattacharyya, 2008 ; Ferguson & Bodner, 2008).

Même si une évolution positive de la hiérarchisation des connaissances des étudiants a été constatée durant leur premier semestre de chimie organique (Nash *et al.*, 2000), il semble que les étudiants n'aient pas les capacités de représentation des problèmes et de raisonnement suffisantes pour résoudre des problèmes conceptuels (Bowen, 1990 ; Cracolice *et al.*, 2008 ; Domin *et al.*, 2008 ; Taagepera & Noori, 2000) ; ils peuvent seulement résoudre des problèmes algorithmiques qui ne nécessitent que l'application de procédures mémorisées sans nécessairement de compréhension conceptuelle (Cracolice *et al.*, 2008 ; Taagepera & Noori, 2000).

2. Les enseignants et les didacticiens proposent plusieurs explications

Nous synthétisons ici les principaux apports d'enseignants et de didacticiens de la chimie organique concernant les difficultés de cet enseignement-apprentissage pendant les premières années universitaires.

2.1. Un important volume de connaissances à traiter en peu de temps

Le volume important des connaissances et le peu de temps disponible pour les traiter sont souvent cités (Black, 1993 ; Johnson, 1990 ; Kingsbury, 1986 ; Libby, 1991 ; Libby, 1995 ; Minter & Reinecke, 1985 ; Mullins, 2008 ; Murov, 2007 ; Sartoris, 1992 ; Schearer, 1988 ; Scudder, 1997 ; Wentland, 1994). En particulier Scudder (1997) dénonce la tyrannie du contenu, la majorité des livres qui ont plus de 1000 pages, les cours qui deviennent des concours de rapidité d'écriture et les examens des exercices de restitution de ce contenu.

> *« The teaching of organic chemistry poses a challenge for science education; organic has a well-deserved reputation for difficulty, memorization, and information overload. Most textbooks are well over 1000 pages, and the instructor feels the pressure to fit in as much as possible. This "tyranny of content" discourages novel approaches to teaching. Time pressure to cover the material increases as the field expands. Lectures become writing contests in which the professor's notes become the student's notes without going through the mind of either. Too often, such a course is an exercise in recall rather than reasoning. The very thing that makes science interesting is sometimes left out of introductory courses in the time pressure to cover all the material. »*
>
> *Scudder , 1997, p.777*

Ce leitmotiv est partagé par différents auteurs de livres de chimie organique, qui évoquent la multiplicité des faits et des concepts ainsi que l'introduction constante de nouveaux savoirs (Loumouamou, 1998). Notons que la récente explosion du nombre des réactions chimiques catalysées par les métaux de transition contribue à l'augmentation du volume des connaissances en chimie organique (Grove *et al.*, 2008). La transposition didactique[1] est rendue particulièrement difficile par l'étendue, la complexité et l'évolution rapide du savoir de référence (Loumouamou, 1998 ; Barlet *et al.*, 1999).

> *« La chimie organique, marquée par la création exponentielle de nouvelles espèces et la grande diversité des situations expérimentales observées, est perçue comme difficile à enseigner par beaucoup d'enseignants : comment choisir des exemples significatifs et représentatifs mais en même temps suffisamment simples pour être enseignables ? »*
>
> *Barlet et al., 1999, p.26*

Face à ce contenu immense ainsi qu'au rythme rapide du cours qui ne laisse pas le temps de faire des liens et de bien comprendre le « pourquoi », la majorité des étudiants essaient en vain de s'en sortir en cherchant et en apprenant des règles locales qu'ils sortent de leur contexte et appliquent de manière inappropriée (Anderson & Bodner, 2008).

2.2. Un symbolisme ambigu

> *« Pour qui n'y est pas préparé, feuilleter certains ouvrages modernes de chimie organique peut être déroutant : les formules se réduisent souvent à des graphismes géométriques d'un dépouillement extrême où n'apparaissent que timidement les symboles de quelques atomes, agrémentés par contre de flèches de formes variées, droites ou courbes, à une ou deux pointes (parfois même elles ont perdu la moitié de leur pointe et ressemblent à des hameçons). ».*
>
> *Arnaud, 1971, p.5*

[1] Loumouamou utilise l'approche traditionnelle de Y. Chevallard selon laquelle la transposition didactique est le processus de transformation du savoir savant (savoir de référence élaboré par la communauté des chercheurs) au savoir à enseigner et qui se poursuit jusqu'au savoir enseigné.

Les chimistes pensent utiliser des idéogrammes (comme certains idéogrammes chinois dont il faut seulement connaître la prononciation car tout le monde comprend immédiatement ce qu'ils signifient) alors qu'il s'agit en fait de pictogrammes qui n'ont pas de signification en eux-mêmes mais une signification que chaque chimiste s'est construite. C'est ainsi qu' Ourisson (1986) dénonce les non-dits, les ambiguïtés voire le laxisme dans l'utilisation du symbolisme en chimie. Plus spécifiquement, il note que les chimistes organiciens modifient sans le dire la convention d'écriture des réactions chimiques (fig. ✦3) ou encore qu'ils entretiennent des ambiguïtés lorsque la même écriture peut concerner une seule molécule ou mille milliards de molécules (Ourisson, 1986 ; Bucat, 2004 ; Ladhams Zieba, 2004) (fig. ✦4).

FIGURE ✦ 3 **Représentation d'une réaction en chimie organique**

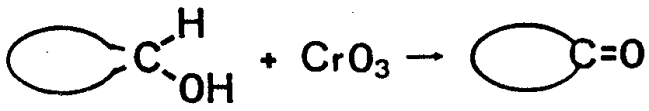


FIGURE ✦3
Sur cet exemple de la réaction d'oxydation d'un alcool, Ourisson (1986, p.41) montre comment les chimistes organiciens modifient la convention d'écriture des réactions chimiques en remplaçant une équation de réaction où les nombres stœchiométriques sont ajustés par une écriture où la stœchiométrie et certains produits ne sont plus pris en compte.

L'étude des mécanismes réactionnels en chimie organique n'échappe pas aux non-dits déplorés par Ourisson. Le symbolisme des flèches courbes expliquant les déplacements électroniques est apparu au début de XX^{ème} siècle dans les articles de chimistes organiciens anglais renommés (Lapworth, Robinson, Ingold) qui n'en précisaient ni la signification ni l'utilisation, ce symbolisme leur semblant suffisamment explicite (Agrebi, 2004). La communauté scientifique s'est ensuite peu à peu approprié cette notation sans véritable débat. De la même manière les enseignants laissent souvent eux aussi ce symbolisme dans l'implicite. Ainsi le système symbolique s'apprend à l'occasion de son utilisation par l'enseignant, sans qu'en soient explicitées les règles de fonctionnement (Agrebi & Le Maréchal, 2001 ; Agrebi, 2004).

> *« Le prof met sa réaction et n'explique rien, au départ je ne comprenais rien, les δ+ et δ- réagissaient comme ça. C'est en redoublant comme Emma, en faisant des petites notes au crayon que j'ai commencé à comprendre. Tout ce qu'il disait oralement c'était l'essentiel et il n'y avait rien dans son écrit. Mais on ne pouvait pas écouter et écrire en même temps. »*
>
> *Lise (Loumouamou, 1998, p. 318)*

Les étudiants doivent donc élaborer leur propre système lexical qui ne permet jusqu'à un niveau élevé d'études qu'une lecture brute des symboles : désignation des objets représentés (carbone, hydrogène, doublet, groupement OH, etc.) et utilisation de verbes de mouvement (déplacement de doublets, de liaisons, d'entités chimiques, etc.). Et ce n'est que tardivement, au niveau de la préparation à l'agrégation, qu'Agrebi (2004) constate une évolution dans le langage qui se traduit à la fois par une modification des verbes utilisés et par les niveaux de connaissances mobilisés (attaque nucléophile, groupement protecteur, carbone électropositif, facteur entropique, etc.). Ces étudiants manifestent alors une vision plus globale du problème posé et ils le traitent de manière plus concise et précise.

FIGURE ✦4 **Une écriture source de confusions pour les étudiants**

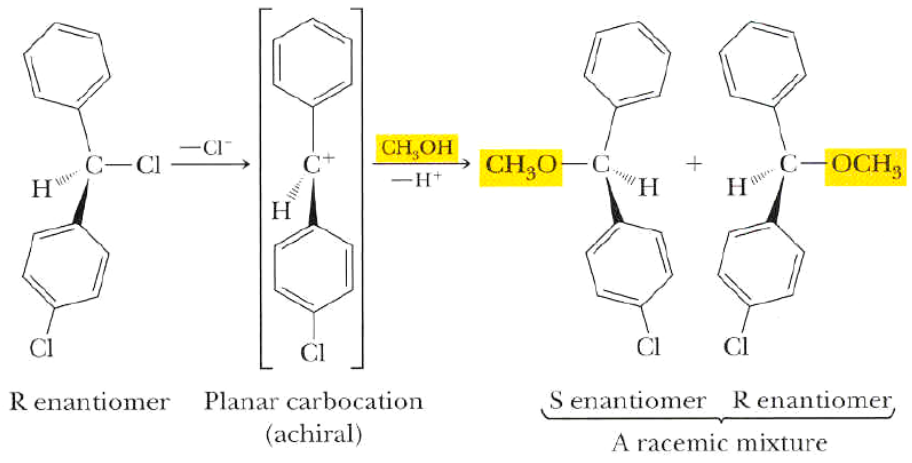


FIGURE ✦4

Bucat (2004, p.224) reproduit cette figure tirée d'un livre de chimie organique afin de montrer la confusion entretenue par ce type de représentation où semblent co-exister le niveau moléculaire (le schéma réactionnel concerne au départ une seule molécule) et le niveau macroscopique (un mélange de deux produits est finalement obtenu). Ladhams Zieba (2004) montre que ce type de représentation entraîne des confusions chez les étudiants.

Le symbolisme de chimie organique n'a pas de signification claire pour la plupart des étudiants du premier cycle universitaire si on se réfère aux résultats de plusieurs chercheurs américains (Anderson & Bodner, 2008 ; Bhattacharyya, 2008 ; Bhattacharyya & Bodner, 2005 ; Bodner & Weaver, 2008 ; Ferguson & Bodner, 2008 ; Pribyl & Bodner, 1987). Par exemple les étudiants montrent des difficultés avec les représentations des molécules. Ils considèrent aussi que les flèches courbes ne sont qu'un mode de représentation du déroulement de la réaction et qu'elles n'expliquent pas pourquoi la réaction se produit ainsi. En outre la représentation d'une synthèse organique sur le papier apparaît pour les étudiants comme un exercice artificiel sans lien avec la réalité du laboratoire. L'extrait ci-dessous illustre que de telles difficultés existent encore quatre ans après le baccalauréat.

> *« En chimie organique, il était demandé de nombreux mécanismes de réaction : ceux-ci ont été rarement abordés ou alors de façon fantaisiste, sans parler de la confusion fréquente entre les doublets non liants et la charge négative portée par un atome. »*
>
> *Extrait du rapport de jury du CAPES Externe de Physique-Chimie, session 2003, p.13*

Ainsi Bhattacharyya & Bodner (2005) montrent grâce à des entretiens avec 14 étudiants de première année, que lors de la résolution de problèmes en chimie organique la plupart d'entre eux reprennent des séquences d'étapes mémorisées et reconstituent un puzzle ; les concepts sous-jacents et les modèles ne sont retenus que sous forme de mots vides de sens et vainement restitués (Bhattacharyya, 2008). Les étudiants peuvent parfois élaborer des procédures surprenantes : par exemple lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes concernant les mécanismes réactionnels, les étudiants relient fortement la représentation des réactifs à la réaction qui a lieu, indépendamment des caractéristiques de la réaction elle-même (fig. ✦5 et ✦6) ; ces procédures semblent renforcées par les modes de représentation des réactions choisis par les enseignants et les auteurs de livres (Ladhams Zieba, 2004 ; Bucat, 2004).

FIGURE ✦ 5 **Influence de la position relative des réactifs représentés**

Deux présentations de la même question posée aux étudiants.

Réponse majoritairement obtenue pour chaque variante.

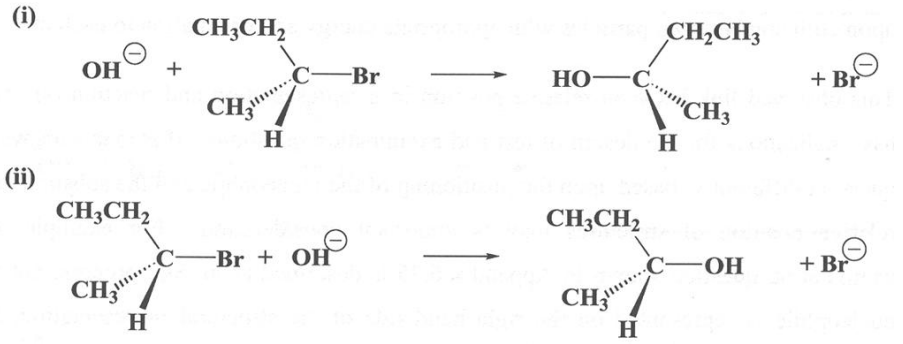


FIGURE ✦5

Ladhams Zieba (2004, p.237) demande à 35 étudiants de 2ème année de prévoir le produit obtenu lorsqu'on fait réagir l'ion hydroxyde avec un dérivé bromé. Chaque étudiant est soumis soit à la variante (i) soit à la variante (ii) dans laquelle la position relative des deux réactifs est inversée. Lorsque l'ion hydroxyde est représenté à gauche du dérivé bromé, les étudiants proposent majoritairement l'alcool avec inversion de la configuration (OH « à gauche »). Lorsque l'ion hydroxyde est représenté à droite du dérivé bromé, les étudiants proposent majoritairement un alcool avec rétention de la configuration (OH « à droite » à la place de Br).

FIGURE ✦ 6 **Influence du mode de représentation d'un réactif**

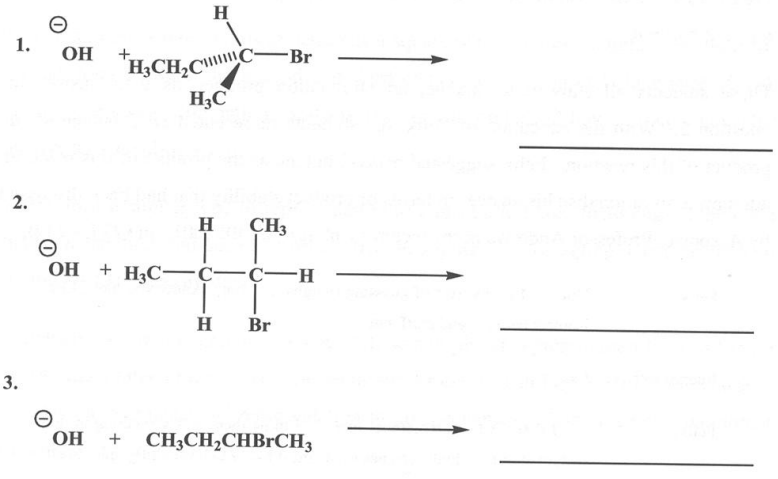


FIGURE ✦6

Lors d'entretiens Ladhams Zieba (2004, p.239) demande à 7 étudiants de 2ème année de prévoir les produits obtenus lorsqu'on fait réagir l'ion hydroxyde avec un dérivé bromé. Elle montre que si dans une question les réactifs sont représentés en trois dimensions les étudiants proposent préférentiellement une substitution conduisant au butan-2-ol ; si les mêmes réactifs sont représentés en deux dimensions ils optent alors plutôt pour une élimination conduisant au but-2-ène ; si la formule du substrat est compacte la réaction proposée dépendra de la représentation des réactifs que l'étudiant choisira lui-même. Ceci serait lié au fait que des enseignants (Ladhams Zieba, 2004) ou des auteurs de livres (Bucat , 2004) ont tendance à présenter les mécanismes de substitution nucléophile en trois dimensions alors que les mécanismes d'élimination sont représentés avec des formules planes.

2.3. Un savoir complexe

Il semble que dans le savoir de référence de la chimie organique les solutions algorithmiques soient quasi inexistantes (Laurenço, 1998) ainsi que des chemins bien balisés où tout découlerait de déductions univoques (Trong Anh, 1994). Ce dernier auteur compare d'ailleurs la « logique du flou » (p.416) du chimiste avec celle du joueur d'échecs.

> *« Aucune des méthodes actuelles de la chimie théorique ne permet de calculer directement un plan de synthèse pour une molécule donnée, pas plus qu'il n'existe de solution algorithmique à un problème de synthèse. […] L'espace du problème est d'une taille considérable car les multiples combinaisons des dizaines de milliers de molécules disponibles constituent autant d'ensembles d'états initiaux possibles et toutes les réactions connues ou à découvrir sont des opérateurs potentiels, […] le parcours de l'espace doit être guidé par des heuristiques afin d'éviter l'explosion combinatoire qui résulterait d'une recherche exhaustive des solutions. »*
>
> *Laurenço, 1998, pp.23-24*

La résolution de problèmes en chimie organique par les experts nécessite d'articuler différents modèles voire même de choisir entre plusieurs modèles compétitifs (Bhattacharyya, 2008). Pour Loumouamou (1998) la chimie organique s'est constituée historiquement à travers trois paradigmes : le paradigme Lewis (approche moléculaire selon Lewis), le paradigme milieu (permettant des considérations sociomoléculaires avec également le volet macroscopique de la thermodynamique) et le paradigme quantique. Toujours d'après cet auteur il existe une grande distance entre le savoir savant et le savoir enseigné (dans les livres) : les raisonnements du chimiste organicien se font de plus en plus dans le paradigme quantique, alors que le savoir enseigné se focalise sur le paradigme Lewis, les effets du milieu étant peu présents (sauf pour les substitutions nucléophiles).

En outre il semble important pour l'évaluation des étudiants que l'objet d'enseignement puisse vivre dans une niche écologique[1] autorisant des prédictions simples et ayant peu de liens avec des domaines extérieurs à la cohérence moléculaire (Loumouamou, 1998). Par exemple les réactions d'addition des halogénures d'hydrogène sur les liaisons doubles ne sont essentiellement traitées que selon un mécanisme ionique simplifié (avec passage par un carbocation). Les conditions expérimentales sont oubliées hormis la présence ou l'absence de peroxydes qui permet alors d'envisager un mécanisme radicalaire. Le mécanisme de type moléculaire est totalement absent (Loumouamou, 1998). Ainsi les questions portant sur ces réactions dans les sujets de chimie présentés aux concours d'entrée des grandes écoles entre 1975 et 1997 ne visent que la vérification de l'apprentissage de la régiosélectivité et sa justification classique par l'étude de la stabilité du carbocation, indépendamment de toute

[1] Loumouamou utilise ici la notion de niche écologique de Y. Chevallard.

autre considération (Le Goaller & Loumouamou, 1997a ; Le Goaller & Loumouamou, 1997b ; Loumouamou, 1998).

L'omniprésence du paradigme Lewis dans l'enseignement conduit à une simplification excessive des savoirs, les étudiants ne disposent alors pas de tous les arguments nécessaires utilisés par les experts (Loumouamou, 1998). L'entrée moléculaire dominante conduirait à déséquilibrer l'articulation entre modèles et résultats macroscopiques au profit de modèles nanoscopiques sensés porter à eux seuls l'interprétation et la prédiction de réactions (Barlet & Plouin, 1997). Loumouamou (1998) note que dans les livres de chimie organique le mot « théorie » disparaît rapidement et que les mécanismes réactionnels prennent un statut de certitude et de vérité définitive. Les observations d'enseignants par Johnson (1990) vont dans le même sens. Enfin seraient favorisés la conception du « réactif intelligent » plutôt qu'une approche multifactorielle (fig. ✦7) (Barlet & Plouin, 1997 ; Ourisson, 1986 ; Loumouamou, 1998) et des raisonnements linéaires causaux plutôt que systémiques (Loumouamou, 1998). Les étudiants ont beaucoup de mal à considérer simultanément plusieurs approches dans la résolution d'un problème de chimie organique : seule l'approche moléculaire est utilisée et les conditions réactionnelles sont oubliées. De ce fait ils n'ont pas de fil conducteur et l'évolution du raisonnement doit beaucoup au hasard ; l'apprentissage du jeu de flèches leur donne alors la direction à suivre. Par conséquent pour les étudiants apprendre par cœur apparaît plus productif que raisonner.

Enfin Green & Rollnick (2006) montrent que la chimie organique fait partie des enseignements scientifiques les plus difficiles en deuxième année universitaire. La difficulté viendrait en partie de la nature du contenu disciplinaire et de la structure linéaire de cet enseignement. Dans une structure linéaire (ou cumulative) la compréhension de notions dépend de la maîtrise d'autres notions qui ont été étudiées antérieurement. En effet certaines notions tels que les déplacements électroniques doivent être introduites tôt dans le cours de chimie organique car elles sont utilisées ensuite dans toutes les autres parties. Les étudiants qui n'ont pas réussi à identifier un tel principe organisateur auraient recours par conséquent à la mémorisation pour l'examen. Il s'agirait d'une mémorisation à court terme en l'absence d'un principe organisateur.

Nous nous demandons donc comment les étudiants pourraient abandonner l'apprentissage par mémorisation qu'ils jugent plus efficace au profit de raisonnements utilisant les modèles de la chimie organique.

FIGURE ✦ 7 **La conception du « réactif intelligent » en chimie organique**

Figure 7-a :

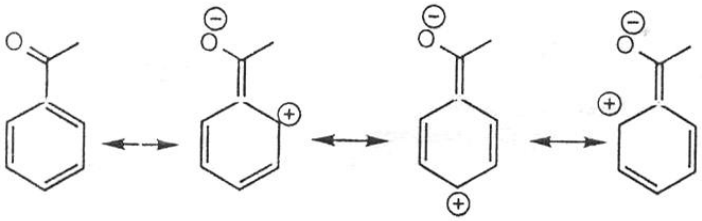


Figure 7-b :

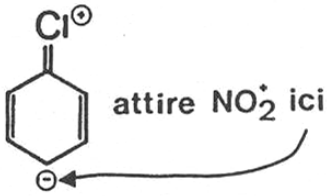


FIGURE ✦7

Les deux exemples représentés ici concernent la régiosélectivité des substitutions électrophiles aromatiques. Avec le schéma de la figure 7-a Barlet & Plouin (1997, p.150) montrent l'effet d'orientation du carbonyle selon une entrée strictement moléculaire permettant d'écrire différentes formes mésomères du substrat. Les étudiants arrivent ainsi à penser qu'un électrophile n'attaquera que les sites nucléophiles ou pas trop électrophiles à l'issue d'une sorte de « téléguidage », d'où une orientation en méta dans ce cas. Pour Ourisson (1986, p.43) il y a toujours une proportion importante d'étudiants qui expliquent la substitution par l'intervention de formes comme à la figure 7-b. Au contraire la vision scientifique considère que parmi une multitude de chocs aléatoires entre molécules, certains chocs sont plus efficaces que les autres. Ces derniers correspondent à un chemin réactionnel plus favorable et conduisent à la régiosélectivité observée (ortho/para ou méta).

3. Des améliorations sont devenues nécessaires

3.1. Des améliorations dans la mise en œuvre de cet enseignement

Afin de lutter contre les difficultés des étudiants et renforcer leur apprentissage dans le cadre des enseignements existants, de nombreuses améliorations ont vu le jour concernant la forme et les modalités de mise en œuvre de cet enseignement-apprentissage.

De nouveaux supports d'enseignement ont été proposés : une carte des réactions chimiques (Murov, 2007), un cahier des réactions classées notamment selon les groupes fonctionnels visés (Esteb *et al.*, 2006 ; Teixeira & Holman, 2008), un organigramme pour gérer plus facilement la compétition entre substitutions et éliminations (Hagen, 1988), un support vidéo illustrant une réaction de chimie organique avec des trajectoires de molécules (Raff, 1974), des puzzles pour travailler les mécanismes réactionnels (Erdik, 2005), des

analogies magnétiques (Garde, 1987 ; Hervas & Silverman, 1991 ; Kjonaas, 1984 ; Neeland, 2002 ; Schobert, 1973 ; Shaw & Shaw, 1991). Depuis les années 1970 les auteurs de livre de chimie organique mettent eux aussi en avant une amélioration de la forme (par exemple l'introduction de couleurs dans les équations et les mécanismes des réactions) associée à des conseils méthodologiques pour l'apprentissage (Loumouamou, 1998).

Des publications ont une dimension pédagogique plus générale (indépendante des contenus) : apprendre à apprendre et utiliser fréquemment des petits contrôles en début de cours (Ellis, 1994), travailler sur l'évaluation et les objectifs d'apprentissage en chimie organique (Hodges & Harvey, 2003), utiliser des logiciels d'instruction pour que les étudiants s'entraînent (Chamala *et al.*, 2006 ; Penn & Nedeff, 2000 ; Penn & Al-Shammari, 2008).

Des travaux collaboratifs et des activités de résolution de problèmes ont été mis en place (Black & Deci, 2000 ; Bradley *et al.*, 2002 ; Browne & Blackburn, 1999 ; Cooley, 1991 ; De Jesus, 1995 ; Hagen, 2000 ; Horowitz & Schwartz, 2004 ; Libby, 1995 ; Platt *et al.*, 2008 ; Vosburg, 2008 ; Zoller & Pushkin, 2007). Tien *et al.* (2002) montrent l'impact positif en chimie organique du travail en petits groupes d'étudiants aidés par un étudiant plus ancien, ou encore Huddle (2000) et Green & Rollnick (2006) montrent l'efficacité d'une session de présentation de posters organisée par Huddle (2000). Une approche complémentaire consiste à faire vivre aux étudiants quelques pratiques du chimiste organicien en organisant des séminaires interdisciplinaires (Almeida & Liotta, 2005), des travaux sur des articles de recherche ou des recherches bibliographiques (Gallagher & Adams, 2002 ; Shibley Jr. *et al.*, 2001), ou des activités de synthèse organique prenant appui sur un cahier de réactions (Esteb *et al.*, 2006).

Nous souscrivons à ces propositions qui favorisent les activités de résolution de problèmes et les échanges entre les étudiants. Et nous sommes surtout sensibles à l'idée de montrer aux étudiants certains aspects des pratiques du chimiste organicien.

De façon plus surprenante différents auteurs (Black, 1993 ; Ellis, 1994 ; Heeren, 1990 ; Schearer, 1988) vont jusqu'à se délester sur les étudiants d'une bonne partie de l'important contenu à traiter. Pour cela ils leur donnent un guide de travail afin que les étudiants réalisent hors du cours une étude du thème en question dans un livre de chimie organique. Ceci permet ensuite à l'enseignant de centrer le cours sur les principales difficultés du contenu disciplinaire, d'organiser des discussions et des échanges entre étudiants, ou encore de proposer des problèmes à résoudre. Ce délestage du contenu hors des séances de cours

nous questionne sur les fondements de l'activité d'enseignement et sur la pertinence de conserver les contenus disciplinaires qui sont ainsi délestés hors du cours.

3.2. Une redéfinition du contenu disciplinaire lui-même

Élaguer une partie du contenu, actualiser les applications et faire maîtriser l'essentiel dans un premier temps pour des débutants en chimie organique, sont des principes que nous retrouvons chez différents auteurs tels que Ellis (1994), Forbes (2004), Goldish (1988) ou encore Reingold (2004). Ellis (1994) suggère par exemple de réduire le nombre de réactions en chimie organique à une soixantaine maximum parmi les plus représentatives afin de résoudre des problèmes de synthèse organique, ou encore de diminuer la complexité du contenu en omettant certains concepts théoriques (contrôles thermodynamique et cinétique, symétrie des orbitales) ainsi que les discussions sur les compétitions délicates entre mécanismes (S_N2, S_N1, E1 et E2). Quant à Reingold (2004) il suggère de commencer par un cours de biochimie permettant d'élargir les thèmes et les applications abordés (et donc de davantage intéresser les étudiants) tout en intégrant certains concepts de chimie organique.

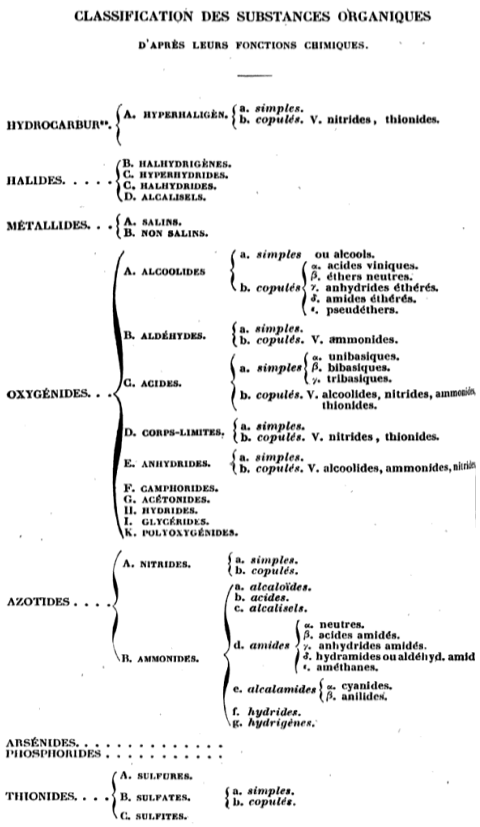
Nous rejoignons ces auteurs sur la nécessité de réétudier la pertinence des savoirs à enseigner. Il semble que la chimie organique ait beaucoup accumulé de savoirs divers et il serait judicieux d'en faire le tri pour améliorer son enseignement. Cependant un enseignant ne peut pas faire de tels choix lorsqu'il est soumis à un programme d'enseignement prescrit par son Institution. C'est pourquoi nous nous interrogeons sur la possibilité de redéfinir autrement le contenu disciplinaire actuel en restant dans le cadre des programmes quand ils sont définis. L'approche en spirale décrite ci-dessous est une solution intéressante.

D'autres réorganisations sur l'année sont envisagées afin d'améliorer la progressivité du cours et de maintenir la motivation des étudiants : il s'agit de répartir sur deux cycles successifs de chimie organique les connaissances d'un cours habituellement traité sur une année (Gravert, 2006 ; Grove *et al.*, 2008 ; Minter & Reinecke, 1985 ; Sartoris, 1992). Par exemple Grove *et al.* (2008) proposent une approche en spirale sur deux semestres. Le premier semestre offre un panorama de la chimie organique avec la nomenclature, les principales propriétés physiques et chimiques des groupes fonctionnels (des alcènes aux acides carboxyliques) ainsi que des processus mécanistiques de base. Lors du semestre suivant les étudiants revisitent ce qui a été vu au 1er semestre en se concentrant sur des mécanismes plus avancés et des réactions modernes. Si le premier semestre a conduit à des évaluations positives par les étudiants ainsi qu'une bonne moyenne à l'examen, le second

semestre a été plus difficile pour les étudiants et les résultats à l'examen de l'*American Chemical Society* (ACS) ont été moins bons qu'antérieurement. Les auteurs invoquent notamment le glissement d'un travail de mémorisation vers un travail de compréhension conceptuelle (plus difficile de fait) ou le déphasage entre ce nouveau cours (aux contenus réactualisés) et l'examen de l'ACS. Ils invoquent aussi le fait qu'avec l'ancien cours (structuré par fonction) de nombreux étudiants abandonnaient et seuls les meilleurs restaient, alors qu'avec ce nouveau cours la sélection par l'abandon a quasiment disparu.

FIGURE ✦ 8 **Aux origines de la structuration du contenu par fonctions**

Figure 8-a :



CLASSIFICATION DES SUBSTANCES ORGANIQUES

D'APRÈS LEURS FONCTIONS CHIMIQUES.

HYDROCARBURES. { A. HYPERHALIGÈN. { a. *simples.* b. *copulés.* V. nitrides, thionides.

HALIDES. { B. HALHYDRIGÈNES. C. HYPERHYDRIDES. C. HALHYDRIDES. D. ALCALISELS.

MÉTALLIDES. { A. SALINS. B. NON SALINS.

OXYGÉNIDES. { A. ALCOOLIDES { a. *simples* ou alcools. b. *copulés* { α. acides viniques. β. éthers neutres. γ. anhydrides éthérés. δ. amides éthérés. ε. pseudéthers.

B. ALDÉHYDES. { a. *simples.* b. *copulés.* V. ammonides.

C. ACIDES. { a. *simples* { α. unibasiques. β. bibasiques. γ. tribasiques. b. *copulés.* V. alcoolides, nitrides, ammonides, thionides.

D. CORPS-LIMITES. { a. *simples.* b. *copulés.* V. nitrides, thionides.

E. ANHYDRIDES. { a. *simples.* b. *copulés.* V. alcoolides, ammonides, nitrides

F. CAMPHORIDES. G. ACÉTONIDES. H. HYDORIDES. I. GLYCÉRIDES. K. POLYOXYGÉNIDES.

AZOTIDES. { A. NITRIDES. { a. *simples.* b. *copulés.*

B. AMMONIDES. { a. *alcaloïdes.* b. *acides.* c. *alcalisels.* d. *amides* { α. neutres. β. acides amidés. γ. anhydrides amidés. δ. hydramides ou aldéhyd. amid ε. améthanes. e. *alcalamides* { α. cyanides. β. anilides. f. *hydrides.* g. *hydrigènes.*

ARSÉNIDES.

PHOSPHORIDES.

THIONIDES. { A. SULFURES. B. SULFATES. { a. *simples.* b. *copulés.* C. SULFITES.

Figure 8-b :

I. Matières organiques. - Analyse immédiate. - Analyse élémentaire et détermination de la formule des composés organiques. - Loi des substitutions. - Formules développées. Fonctions chimiques, groupements fonctionnels.
SERIE GRASSE

II. Généralités sur les carbures d'hydrogène. Hydrocarbures saturés. Hydrocarbures éthyléniques. Hydrocarbures acétyléniques.

III. Alcools. - Isomérie dans les alcools : Alcools primaires, Alcools secondaires, Alcools tertiaires. - Alcool éthylique. Ses éthers.

IV. Alcools homologues de l'alcool éthylique.

V. Alcools dérivés des carbures non saturés C^nH^{2n} et CnH^{2n-2}. – Alcool allylique, etc. – Alcool propargylique.

VI. Alcools polyatomiques ou polyalcools – Dialcools : Glycols.

VII. Trialcool : Glycérine. Tétraalcool : érythrite. Hexaalcools. Heptaalcools.

VIII. Aldéhydes. – Cétones. – Aldéhydes et cétones mixtes : Sucres. Glucoses. – Glucosides.

IX. Acides organiques. – Acides monobasiques. – Acides gras. – Acides de la série acrylique.

X. Acides polybasiques. – Acides à fonction mixte.

XI. Composés azotés basiques correspondant aux alcools. – Amines, phosphines, arsines. – Amines-Alcools. Diamines. Amines-Acides.

XII. Composés azotés neutres. Amides. Nitriles. Carbylamines.
SERIE AROMATIQUE

XIII. Carbures aromatiques : Carbures benzéniques. Carbures de la famille du triphénylméthane. Carbures pyrogénés.

XIV. Phénols et leurs dérivés. Monophénols : Acide phénique. Acide picrique. Crésols. Naphtols. Diphénols : Pyrocathéchine. Résorcine. Hydroquinone. Orcine. Triphénols : Pyrogallol. Phloroglucine. Quercite. – Alcools aromatiques : Alcool benzylique. Alcool cinnamique. Cholestérine. Inosite. Phénols à fonction mixte : Saligénine. Alcool anisique. Eugénol. Alcool vanillique.

XV. Aldéhydes aromatiques. Aldéhydees à fonction mixte. Cétones aromatiques. Quinones. Cétones à fonction mixte.

XVI. Acides aromatiques à fonction simple. Acides à fonction mixte.

XVII. Amines aromatiques. Dérivés du triphénylméthane. Rosanilines. Phtaléines.

XVIII. Amides. Imides. Nitriles. Carbylamines aromatiques.

XIX. Composés azoïques. Hydrazoïques, diazoïques. Hydrazines.

XX. Série terpénique. Essence de térébenthine et ses isomères. Pinène. Limonène. Dipentène. Camphène. Camphres et leurs dérivés. Caoutchouc. Gutta-percha.

XXI. Furfurane. Furfurol. Thiophène. Pyrrol. Indol. Indigo.

XXII. Bases pyridiques et quinoléiques.

XXIII. Alcalis organiques végétaux ou alcaloïdes. Des quinquinas : quinine et cinchonine. Des strychnées : Strychnine, brucine. Alcaloïdes de l'opium : Morphine, codéine, etc. Des tabacs : Nicotine. Des ombellifères : Cicutine. De la belladone : Atropine. De l'érythroxylon coca : Cocaïne.

XXIV. Albumine. – Caséine. – Lait. – Fibrine. - Myosine. – Osséine. Gélatine. – Sang. Hémoglobine.

XXV. Fermentations. – ferments organisés. – Ferments solubles. – Fermentation alcoolique. – Boissons fermentées. – Vin. – Bière. – Cidre. – Alcools d'industrie. – fermentation acétique. – Fermentation lactique. – fermentation butyrique. Fermentation visqueuses. Fermentation gallique. Fermentations ammoniacale. – Fermentation putride. – Conservation des matières animales.

FIGURE ✦8

D'après Terrien (1998), jusqu'en 1840 les livres traitaient la chimie organique selon une approche descriptive se focalisant sur l'origine biologique ou l'usage médical, c'est-à-dire fondée sur les principes immédiats (la bile chez les animaux, les résines chez les végétaux, etc.). C'est alors que Gerhardt proposa une rationalisation du classement des espèces chimiques en séries, faisant un lien entre leur structure et leurs propriétés. La figure 8-a reprend un extrait du livre de Gerhardt (1845) avec une classification liée à la précédente, celle des fonctions chimiques. Les livres de chimie organique qui furent publiés ensuite tentèrent de concilier les deux approches : celle de Gerhardt et des séries avec celle plus ancienne des principes immédiats. La figure 8-b présente les titres des chapitres de la partie « chimie organique » du livre de Troost & Péchard (1910).

C'est justement l'abandon de la structuration traditionnelle par fonction que prône Libby (1991). Il argumente en soulignant le changement d'approche au XXème siècle en chimie organique avec l'introduction des mécanismes réactionnels, alors qu'est maintenue dans l'enseignement actuel une structuration passéiste des contenus (fig. ✦8). Libby (1991) suggère que cette structuration serait encore très répandue dans l'enseignement, ce que confirme Johnson (1990) après avoir étudié comment la chimie organique est enseignée dans 33 établissements américains. Le problème est que ce type de structuration ne tient pas compte de l'expérience limitée de l'étudiant moyen et débutant en chimie organique, et introduit beaucoup de concepts en même temps avant d'aborder l'étude des différentes fonctions et des réactions qui leurs sont associées (Libby 1991). C'est pourquoi il propose une structuration qui est plus progressive selon lui vis-à-vis des concepts en jeu (fig. ✦9).

FIGURE ✦ 9 **Structuration du contenu proposée par Libby (1991)**

Course Syllabus

I. Bonding, Isomerism, and Organic Functional Groups
II. Stereoisomerism and Conformational Analysis[a]
  A. Geometrical Isomerism
  B. Configurational Isomerism
  C. Conformational Analysis
III. Introduction to Organic Reactions—Equilibrium Controlled Reactions
IV. Acid–Base Reactions
V. Reactions of Carbonyl Compounds
  A. Introduction
  B. Addition Reactions of Aldehydes and Ketones
  C. Addition–Elimination Reactions of Aldehydes and Ketones
  D. Acyl Substitution Reactions of Carboxylic Acids and Their Derivatives
VI. Determination of the Structure of Organic Molecules[b]
  A. Mass Spectrometry
  B. IR Spectroscopy
  C. NMR Spectroscopy
VII. Introduction to Kinetically Controlled Organic Reactions
VIII. Nucleophilic Aliphatic Substitution—S_N1 and S_N2 Reactions
IX. β-Elimination Reactions—E_1 and E_2 Reactions
X. Addition Reactions of Alkenes and Alkynes
XI. Aromatic Compounds and Electrophilic Aromatic Substitution Reactions
XII. Organic Free Radical Reactions
  A. Organic Free Radicals
  B. Addition to Alkenes
  C. Substitution Reactions with Alkanes

[a] This unit can be done at any point before Unit VII. At times I have placed it after Unit V, and it works well.
[b] This unit can be done at any point in the course. I usually do it near the end of first semester or at the beginning of second semester so that the techniques can be used for qualitative organic analysis in the second-semester laboratory.

FIGURE ✦9
Libby (1991, p.635) propose une structuration du contenu se voulant plus progressive : il étudie successivement les différents types de réaction, en commençant par celles sous contrôle thermodynamique avant celles sous contrôle cinétique.

Nous sommes de l'avis de Libby que la structuration par fonction héritée de l'histoire n'est sans doute plus adaptée pour enseigner la chimie organique contemporaine. Il nous faut alors étudier les autres structurations possibles et leur mise en œuvre.

Un contenu disciplinaire structuré selon les principes directeurs, les concepts et les modèles de la chimie organique est suggéré par différents auteurs (Cracolice *et al.*, 2008 ; Ferguson & Bodner, 2008 ; Ilich *et al.*, 2006 ; Kerber, 2002 ; Taagepera & Noori, 2000). En complément d'autres auteurs focalisent leurs propositions sur le symbolisme des mécanismes réactionnels (Agrebi, 2004 ; Ferguson & Bodner, 2008 ; Friesen, 2008 ; Weeks, 1998 ; Wentland, 1994). Tout comme Libby (1991), Karty *et al.* (2007) proposent une structuration par grands types de réaction, en introduisant séparément et progressivement les concepts utiles ; ils obtiennent ainsi à l'examen de l'*American Chemical Society de* meilleurs résultats que les années précédentes où était utilisée la structuration par fonction. Loumouamou (1998) propose une séquence d'enseignement axée sur la modélisation des mécanismes réactionnels, en se rapprochant du savoir de référence. L'évaluation de cette séquence par un exercice spécifique lors de l'examen, montre que l'essai n'est pas concluant. L'auteur le justifie par la difficulté à enseigner une partie selon une logique différente de celle du reste du cours, et par la difficulté pour les étudiants du décloisonnement des disciplines (cinétique, thermodynamique) nécessaire à la résolution des tâches proposées. D'autres auteurs proposent l'utilisation de l'outil informatique dans des activités de modélisation (Jones, 2001 ; Wang, 2005). Au lieu d'attendre le niveau master pour traiter les principes de la stratégie de synthèse organique comme cela se fait généralement, Vosburg (2008) propose un cours de deuxième année de chimie organique sur ce thème et il obtient des avis positifs de ses étudiants .

Une structuration selon les concepts et les modèles de la chimie organique pose aussi la question de choisir lesquels d'entre eux peuvent servir de pôles de structuration. Ainsi Bhattacharyya & Bodner (2005) s'interrogent sur l'opérationnalité des concepts et des modèles, en particulier par rapport à la résolution de problèmes. Cet aspect se retrouve quand Anderson & Bodner (2008) révèlent une tension entre les objectifs d'apprentissage : les étudiants veulent comprendre le pourquoi d'un mécanisme réactionnel et ainsi pouvoir prédire des réactions, mais ils ont l'impression que les enseignants ne leur donnent pas le pourquoi et leur expliquent seulement comment une réaction se déroule. Par conséquent une solution possible est d'améliorer les modèles utilisés ou de les présenter selon un éclairage différent (Akeroyd, 2000 ; Correia, 1988 ; David, 2004 ; Gillespie & Matta, 2001 ; Jullien *et al.*, 1998 ; Karafiloglou, 2002 ; Lin, 1988 ; Mullins, 2008 ; Tonge, 1988 ; Weinhold & Landis, 2001 ; Wiberg, 1996). L'approche de Murphy (2007) est complémentaire lorsqu'il

fournit une table structurée de températures d'ébullition pour près de 400 espèces chimiques organiques, permettant aux enseignants de construire un modèle explicatif et prédictif avec les étudiants.

Des transferts intéressants de la recherche en synthèse organique vers l'enseignement permettent d'envisager une autre manière d'améliorer l'opérationnalité des concepts et des modèles enseignés. Smith (1990) décrit comment des étudiants du premier cycle universitaire peuvent réaliser simplement des analyses rétrosynthétiques de molécules organiques cibles en utilisant des heuristiques empruntées au programme LHASA. Ce programme interactif dont le but initial est de permettre aux chimistes organiciens de résoudre des problèmes de synthèse organique, a été conçu dès 1969 par l'équipe de E. J. Corey, prix Nobel de chimie en 1990 pour ses apports en synthèse organique. De manière analogue l'équipe de Salatin & Jorgensen (1980) a conçu le programme CAMEO qui se fonde sur des considérations mécanistiques et permet de faire rapidement le tri parmi les réactions concurrentes possibles pour des réactifs et des conditions expérimentales donnés. Une heuristique intégrée dans ce logiciel, dite règle du ΔpK_a, a ensuite été reprise et modifiée pour l'enseignement de la chimie organique (Scudder, 1992 ; Straumanis, 2008). Dans son cours de chimie organique Scudder (1997) propose ainsi une série d'éléments mécanistiques de base et d'heuristiques, associés à une trame de résolution de problèmes par les étudiants. Cet auteur mentionne que les avis des étudiants sur son cours sont positifs, de même que les retours obtenus sur le niveau de ses étudiants qui poursuivent leurs études en chimie.

FIGURE ✦ 10 **Logique de base de données contre système expert**

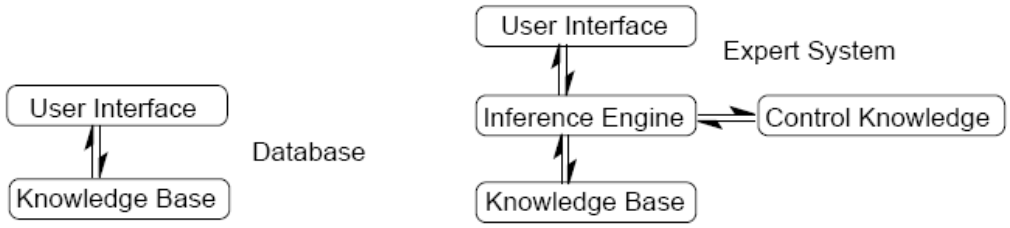


FIGURE ✦10

D'après Scudder (1997, p.777) des cours orientés selon la mémorisation traiteraient les étudiants comme des bases de données vides qu'il faudrait remplir avec un maximum de faits et de concepts. Le résultat serait une base de données inadaptée, incertaine (comme la mémoire) et ne permettant pas de construire une intuition chimique chez les étudiants. Inversement, un système expert dispose de deux modules ou programmes supplémentaires : le moteur d'inférences qui produit différentes solutions alternatives à un problème posé en explorant d'abord les meilleures, et les connaissances de contrôle qui guident le moteur d'inférences pour sélectionner une voie plutôt qu'une autre. En fonctionnant selon ce système on apprendrait aux étudiants à raisonner comme les chimistes organiciens.

Nous nous retrouvons totalement dans un tel enseignement se rapprochant des pratiques de l'expert. Un changement de paradigme est donc indispensable d'après Scudder (1997) : il est nécessaire de passer d'une logique de base de données où les étudiants doivent mémoriser un maximum de faits et de concepts, vers un système expert dans lequel fonctionne un moteur d'inférences guidé par une liste de connaissances de contrôle (fig. ✦10). Nous pensons donc que ce pourrait bien être là une des clés de l'amélioration de l'enseignement de la chimie organique.

4. Mais l'enseignant n'aurait pas une marge de manœuvre suffisante

Des contraintes font obstacle à l'évolution de l'enseignement d'après Loumouamou (1998). Cet auteur mentionne notamment l'existence d'une forme de *« contrat didactique institutionnel »* (p.271). Seraient hors contrat les évaluations intégrant des aspects thermodynamiques en chimie organique. En outre les enseignants et les auteurs de livres devraient enseigner les arguments largement répandus et acceptés jusqu'à ce jour par les évaluateurs externes (jury de concours par exemple) mais de leur côté les évaluateurs externes pourraient difficilement modifier brutalement leurs attentes au risque de pénaliser les étudiants.

Les enseignants ne disposeraient pas non plus des ressources suffisantes pour parvenir à transformer leur enseignement. Il n'existerait que peu de livres de chimie organique alternatifs abordant différemment cet enseignement (Johnson, 1990 ; Loumouamou, 1998 ; Scudder, 1997) or pour Loumouamou (1998) les modifications du contenu ne seraient pérennes que si des ouvrages de référence intégraient de telles modifications.

En outre les enseignants ne disposeraient pas de ressources propres suffisantes. En effet ils semblent désemparés pour choisir ce qui doit être conservé en priorité dans le contenu disciplinaire et ce qui peut subir des coupes ; ils ne sauraient pas non plus comment intégrer dans ce contenu des thèmes plus contemporains (bio-organique, catalyse enzymatique, modélisation informatique, etc.) (Johnson, 1990). Les enseignants auraient aussi certaines habitudes pédagogiques difficiles à changer (Ellis, 1994) et plus spécifiquement des connaissances pédagogiques liées à la chimie organique qu'il faudrait améliorer (Bucat, 2004 ; Green & Rollnick, 2006 ; Ladhams Zieba, 2004).

Les enseignants tâcheraient donc de trouver un équilibre entre les contraintes fixées et les ressources disponibles, c'est pourquoi il leur serait plus facile de fonctionner comme cela a été fait par le passé (Scudder, 1997).

En conclusion, nous souhaiterions permettre aux étudiants d'abandonner l'apprentissage par mémorisation au profit de raisonnements fondés sur les modèles de la chimie organique. Nous pensons que cela passe nécessairement par une restructuration globale du savoir à enseigner, le basculement vers un enseignement plus proche des pratiques du chimiste organicien, et la prise en compte des contraintes et des ressources disponibles des enseignants.

Nous développons notre problématique et notre plan d'étude dans le chapitre suivant.

Chapitre I-2

Problématique et plan d'étude

Suite au bilan que nous venons de dresser notre recherche vise à produire des connaissances utiles pour améliorer l'apprentissage et l'enseignement de la chimie organique dans les deux premières années universitaires. Pour cela il nous semble pertinent d'orienter notre recherche selon une double approche que nous décrivons ici.

1. Problématique

En considérant que les étudiants, les savoirs et l'enseignant constituent les éléments interdépendants d'une structure didactique (Johsua & Dupin, 1999) que nous cherchons à améliorer, nous décidons de choisir deux angles d'attaque complémentaires : le premier concerne l'apprentissage du contenu disciplinaire par les étudiants, le second concerne la place et le rôle du professeur dans cette structure.

1.1. L'apprentissage de la chimie organique et la structuration du contenu

Nous nous questionnons en particulier sur le décalage existant entre les enseignants pour lesquels la chimie organique doit être raisonnée et pensée, et les étudiants pour lesquels la chimie organique doit être principalement mémorisée. Parmi les réponses apportées nous avons noté celles mettant en cause la complexité des notions et du symbolisme utilisés, ou la faiblesse des capacités de raisonnement des étudiants ; tout ceci leur rendrait la chimie organique difficile à appréhender. Cependant Le Goaller & Loumouamou (1997b) ouvrent une voie différente en faisant remarquer que les questions posées aux concours autour de l'hydrohalogénation des alcènes et de la régiosélectivité Markovnikov ne visent que la restitution d'un raisonnement moléculaire habituel dans ce type de question. Nous avons aussi repéré que les concepts et les modèles de chimie organique enseignés pourraient ne

pas être vraiment opérationnels. Si tel était le cas, serait-ce dû aux concepts et aux modèles utilisés, ou serait-ce plutôt par rapport aux tâches proposées aux étudiants ? Dans le premier cas un travail consisterait à rendre les concepts et les modèles plus efficaces, plus prédictifs ; ceci rejoint la proposition de Scudder (1997) d'introduire de nouvelles heuristiques (règle du ΔpKa par exemple). Dans le second cas ce n'est pas l'opérationnalité intrinsèque des concepts et modèles qui devrait d'abord nous intéresser, mais plutôt la mise en place de situations et de problèmes afin que les concepts et les modèles acquièrent du sens pour les étudiants (Vergnaud, 1990).

Peut-être que les problèmes actuellement proposés aux étudiants ne peuvent être réussis qu'avec des procédures de bas niveau cognitif (mémorisation et restitution de faits, méthodes et algorithmes simples), la voie conceptuelle quant à elle n'étant que partiellement efficace voire pas du tout. La résolution conceptuelle de telles tâches mal définies nécessiterait peut-être des modèles plus puissants et complexes ainsi qu'une capacité de mémoire de travail trop importante pour être réalisable par les étudiants. Si les tâches proposées actuellement aux étudiants rendent effectivement inopérante l'approche conceptuelle au profit de la mémorisation, il est possible que la structuration par fonction soit alors la plus adaptée puisqu'elle fut construite alors que les modèles actuels n'existaient pas encore. Le décalage observé initialement entre raisonnements et simple mémorisation ne serait alors que le résultat d'une sorte de malentendu entre enseignants et étudiants : les premiers auraient une vision contemporaine de la chimie organique et de ses modèles lorsqu'ils l'enseignent, les derniers seraient quant à eux cantonnés dans les faits à une chimie organique descriptive plus ancienne.

Nous pensons donc qu'il existe en chimie organique des relations fortes entre les procédures de réalisation des tâches demandées aux étudiants, l'efficacité des modèles et la structuration globale du savoir à enseigner. Il est donc nécessaire de les clarifier.

1.2. L'activité des enseignants en chimie organique : la comprendre et leur permettre de la modifier

A notre connaissance, au moment de construire notre cadre de recherche, les enseignants de chimie organique eux-mêmes ont peu fait l'objet de recherches spécifiques, telles que des travaux de Bucat (2004), Johnson (1990), Ladhams Zieba (2004) et Loumouamou (1998).

Il semble que les enseignants aient une faible marge de manœuvre, en raison d'une part des contraintes qui s'exercent sur eux, d'autre part des ressources externes et des connaissances pédagogiques liées au contenu disciplinaire dont les enseignants disposent. Il apparaît donc nécessaire d'étudier l'activité de l'enseignant de chimie organique dans sa globalité et non pas par rapport à la seule finalité de l'enseignement-apprentissage de sa discipline (Goigoux, 2005).

Nous pensons que les démarches d'enseignement actuelles sont très ancrées dans les pratiques, ce qui rend difficile toute innovation ou appropriation d'innovation. Il est donc nécessaire d'étudier l'activité des enseignants afin de trouver et mettre en œuvre des moyens de la modifier.

2. Plan d'étude

Notre étude s'est organisée progressivement autour de trois axes imbriqués lors de la construction, mais que nous présentons de manière séparée. Ainsi l'ordre d'exposition des trois parties ne représente pas une progression chronologique de cette recherche. Le plan d'étude articulé en trois parties, est décrit ci-dessous. Les questions de recherche et les méthodologies associées seront quant à elles décrites précisément dans chacune des parties constitutives de notre compte-rendu de recherche.

2.1. Une analyse du savoir à enseigner puis des propositions (partie II)

La deuxième partie de la thèse consiste en une analyse du savoir à enseigner et plus largement des connaissances et des compétences à acquérir par les étudiants de chimie organique lors des premières années universitaires. Nous cherchons à comprendre le décalage entre enseignants et étudiants sur les capacités cognitives à mettre en œuvre en chimie organique.

Nous analysons spécifiquement la nature des tâches proposées aux étudiants dans les énoncés d'examens et de concours puis nous inférons les stratégies de réalisation de ces tâches et leur coût cognitif pour les étudiants. Nous considérons en particulier la stratégie axée sur l'utilisation des modèles de la réactivité, et la stratégie de mémorisation – restitution. Puis nous étudions la structuration du savoir à enseigner dans les programmes et les livres d'enseignement des premières années universitaires, avant d'analyser ses relations avec les stratégies étudiées précédemment. Ceci nous conduit enfin à quelques propositions didactiques concernant l'enseignement-apprentissage de la chimie organique.

2.2. Une étude exploratoire de l'activité d'enseignants de chimie organique (partie III)

Le but de la troisième partie de la thèse est de comprendre l'activité d'enseignants de chimie organique, pour envisager ensuite son évolution et la mise en œuvre efficace de nos propositions didactiques précédentes.

Cette partie consiste essentiellement en une exploration initiale des pratiques déclarées des enseignants, en se focalisant sur les thèmes de la structuration du savoir enseigné, de la synthèse organique et des mécanismes réactionnels en lien avec les modèles de la réactivité. Nous cherchons à déterminer quels leviers du changement sont envisageables avec un rapport bénéfice / coût satisfaisant pour les enseignants. Ainsi nous espérons pouvoir élaborer des propositions didactiques suffisamment adaptées à la situation réelle des enseignants de chimie organique.

2.3. La conception d'un instrument didactique et l'analyse de l'activité instrumentée d'enseignants (partie IV)

Les deux parties précédentes (associées aux résultats d'autres auteurs) contribuent à nourrir notre réflexion sur la conception d'un instrument didactique visant à aider les enseignants.

Cet instrument est soumis à l'appréciation de plusieurs enseignants placés en simulation de préparation de cours. Cette méthodologie nous permet d'une part de nous renseigner sur la pertinence de l'instrument proposé en vue de le faire évoluer, et d'autre part d'obtenir des données supplémentaires sur l'activité des enseignants perturbée par l'utilisation de l'instrument.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse nous permet d'explorer le problème complexe de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique. Nous obtenons de premiers résultats qui devront être consolidés et complétés lors de recherches futures, en particulier avec des analyses en classe au plus près des étudiants et des enseignants.

Partie II

Le savoir à enseigner jusqu'à bac+2 : analyse et propositions

---

Chapitre II-1 \ Cadre de l'analyse du savoir à enseigner
Chapitre II-2 \ Résultats de l'analyse du savoir à enseigner
Chapitre II-3 \ Propositions pour améliorer cet enseignement-apprentissage

Chapitre II-1

Cadre de l'analyse du savoir à enseigner

1. Cadre théorique : comment évaluer l'efficacité d'un modèle ?

Nous nous sommes interrogés au chapitre précédent sur le décalage entre enseignants et étudiants à propos des capacités cognitives à mettre en œuvre en chimie organique : les enseignants visent des capacités de raisonnement alors que les étudiants privilégient la simple mémorisation d'un contenu pourtant réputé chargé. Nous faisons l'hypothèse que pour pallier les insuffisances des modèles enseignés dans les raisonnements liés à la réactivité, les étudiants utiliseraient d'autres stratégies qui leur sembleraient plus efficaces, telles la mémorisation seule. Il nous faut donc préciser tout d'abord ce qui caractérise la qualité d'un modèle.

1.1. Un modèle doit être simple mais exhaustif

Tout comme le physicien ou le biologiste, le chimiste (par exemple le chimiste organicien) utilise des modèles pour étudier les propriétés physiques et chimiques des espèces qu'il manipule (Dumon, 2005 ; Loumouamou, 1998). Les modèles sont des outils théoriques modestes mais suffisamment efficaces pour interpréter les phénomènes observés et prévoir des évènements susceptibles de se produire (Robardet & Guillaud, 1997).

Pour Walliser (1977) les modèles sont par essence incomplets et imparfaits : ils sont incomplets parce qu'ils privilégient certains aspects du système empirique étudié au détriment d'autres, et ils sont imparfaits puisque la modélisation introduit des propriétés étrangères au système empirique mais nécessaires au fonctionnement du modèle. Cet auteur définit différents critères de qualité d'un modèle : sa cohérence interne, sa validité théorique, sa validité empirique, sa fécondité (à travers les possibilités qu'il ouvre pour la

suite), sa falsifiabilité (au sens de Popper), sa flexibilité (c'est-à-dire sa possibilité d'adaptation à de nouveaux éléments théoriques ou empiriques), sa simplicité et son exhaustivité (c'est-à-dire sa capacité à décrire des systèmes nombreux ou un même système sur une longue période).

> *« Tout ce qui est simple est faux, tout ce qui est compliqué est inutilisable. »*
>
> *P. Valéry cité par Walliser, 1977, p.194*

Le modèle agit alors comme un médiateur qui doit interpréter correctement le registre théorique tout en synthétisant et formalisant le mieux possible le registre empirique (Sinaceur, 1999 ; Walliser, 1977). Notons que l'articulation entre le registre empirique et le registre des théories et des modèles, est une difficulté essentielle lors de l'apprentissage de la physique (Tiberghien & Vince, 2005). C'est tout l'enjeu de la dimension épistémique de certaines séquences d'enseignement-apprentissage où les élèves doivent gérer les tensions entre leur représentation du monde matériel et l'élaboration des savoirs scientifiques (Méheut & Psillos, 2004).

FIGURE ✦ 11 **Trois niveaux de fonctionnement du savoir en physique**

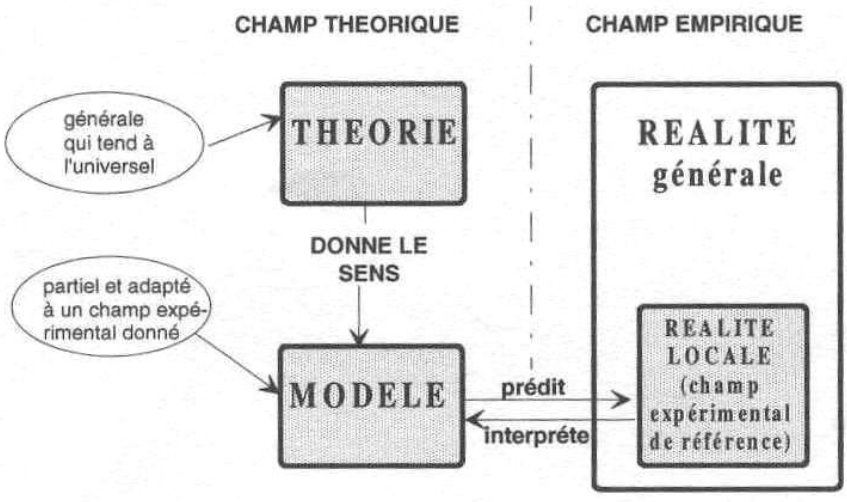


FIGURE ✦11

Robardet & Guillaud (1997) rassemblent et résument dans ce schéma (p.117) le fonctionnement des différents niveaux du savoir en physique. Ils l'illustrent en reprenant l'exemple du physicien Félix Bloch, cité par Arsac & Tiberghien (1991) : Bloch a appliqué la théorie quantique à un modèle simple du cristal. Certaines approximations physiques et simplifications mathématiques ont dû être apportées au modèle, pourtant ce dernier a permis d'expliquer différentes propriétés macroscopiques des cristaux purs : leur conductivité thermique et électrique, leur susceptibilité magnétique, leurs propriétés optiques, etc.

Nous avons vu que la qualité d'un modèle provient aussi de sa capacité à concilier une relative simplicité (par rapport à la théorie) et un domaine de validité suffisant. Un modèle n'est valide que par rapport à un certains nombre d'objets et de phénomènes constituant son champ expérimental de référence (fig. ✦11) (Robardet & Guillaud, 1997 ; Tiberghien, 1994). Martinand *et al.* (1992) étendent la définition du champ expérimental à celle de référent empirique en y incluant des règles d'action et des savoir-faire empiriques. Le référent empirique intègre aussi des savoirs issus de processus antérieurs de construction intellectuelle dont les utilisateurs n'ont plus conscience (Martinand, 2002 ; Autain Kermen, 2007). Kermen & Méheut (2009) distinguent ainsi au sein du registre empirique, le niveau des objets et des évènements (par exemple, le changement de couleur d'un liquide) d'un niveau supérieur constitué des espèces et des transformations chimiques (fig. ✦12).

FIGURE ✦ 12 **Équilibre chimique et modèles enseignés au lycée (Terminale S)**

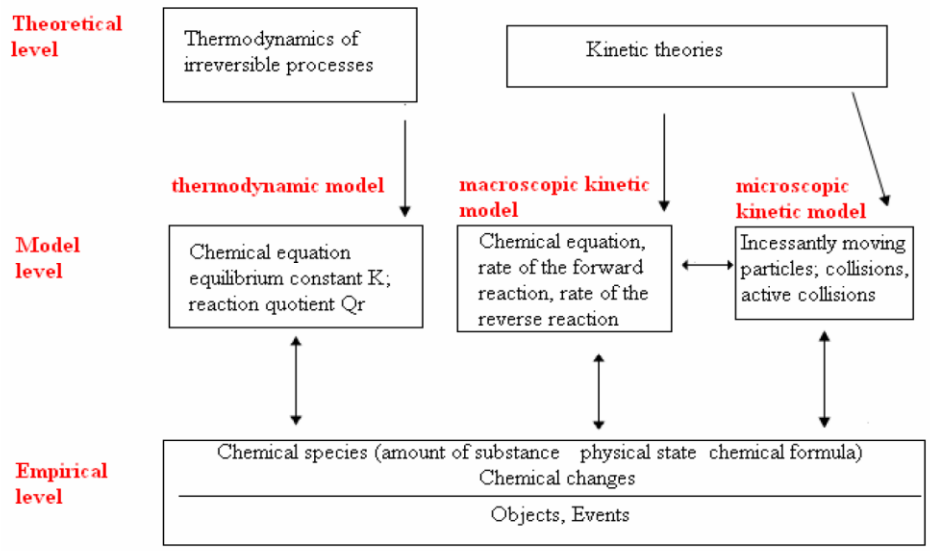


FIGURE ✦12

Kermen & Méheut (2009) effectuent une analyse épistémologique du contenu du programme de Terminale Scientifique au lycée. Elles présentent (p. 26) l'articulation de trois registres : empirique, des modèles et théorique. Le registre des modèles est constitué de trois modèles (thermodynamique, cinétique macroscopique, cinétique microscopique) utilisables pour étudier l'évolution des systèmes chimiques. Le registre empirique est scindé en deux niveaux : le premier niveau concerne les objets et les évènements faisant appel à des concepts peu spécifiques à la chimie (liquide, couleur, etc.) ; le second niveau est celui des espèces chimiques et de leurs transformations.

D'une manière similaire d'autres auteurs considèrent les relations entre le monde perceptible (par exemple le changement de couleur d'un liquide), le monde reconstruit (espèces chimiques, molécules, ions, réactions chimiques…) et le monde théorique

(concepts, principes, modèles) (Le Maréchal, 1999 ; Pekdag & Le Maréchal, 2001). La démarcation théorique - empirique n'est donc pas nette mais elle est plutôt graduelle. Il existe des niveaux de modélisation : chaque modèle d'un niveau est modèle théorique pour le niveau inférieur, et modèle empirique pour le niveau supérieur (Walliser, 1977). En gravissant les niveaux on abandonne certaines caractéristiques particulières des systèmes étudiés pour n'en garder que les plus générales, souvent avec un degré de formalisation de plus en plus poussé.

Nous considérons donc que pour être efficace un modèle doit concilier une relative simplicité par rapport à la théorie et un référent empirique suffisant.

1.2. Un modèle doit être pertinent pour certaines tâches dans des situations données

Même si un modèle doit fonctionner par lui-même de manière cohérente, il n'est jamais pris pour lui-même et *« il est toujours relationnel : modèle de, modèle pour »* (Bachelard, 1979, p.3). Il en va de même dans l'enseignement scientifique où pour éviter une dérive dogmatique Martinand (2002) précise qu'il ne s'agit pas d'enseigner le meilleur modèle qui soit mais de montrer, outre ses caractères hypothétique et modifiable, qu'il est pertinent pour certains problèmes dans certains contextes.

Nous retrouvons ici l'idée de Vergnaud (1990) selon laquelle il ne faut pas réduire le concept enseigné à sa définition mais que c'est à travers des situations et des problèmes à résoudre qu'il prend tout son sens. C'est dans cette optique que Lemeignan & Weil-Barais (1993) jugent indispensable de compléter le champ expérimental (objets, évènements, actions) par l'ensemble des situations explorables et des questions qu'il est possible de traiter avec le concept étudié : ils définissent ainsi le champ questionnemental. Ces auteurs donnent l'exemple du concept de quantité de mouvement qui ne permet pas en soi de résoudre des problèmes d'accrochage ou d'éclatement de mobiles, mais qui peut renseigner sur l'état initial ou final si certaines grandeurs physiques pertinentes pour résoudre le problème sont connues (par exemple certaines vitesses de mobiles).

Nous observons donc ici un changement de perspective. Si le domaine de validité d'un modèle est en premier lieu son référent empirique, il intègre aussi les questions et les problèmes qui peuvent être résolus à l'aide du modèle. Par conséquent, si nous visons l'utilisation d'un modèle précis par les étudiants il faut veiller à bien définir les questions et les problèmes pour qu'ils puissent être effectivement traités à l'aide du modèle visé.

Nous retrouvons ainsi la perspective de Larcher (1994) lorsqu'elle indique que la définition des tâches assignées aux élèves est cruciale, car seules des tâches bien conçues peuvent inciter à la création d'un nouveau registre chez les élèves, celui des modèles.

En effet selon la nature du problème peuvent être observées des procédures de résolution différentes (Johsua & Dupin, 1999). Des travaux de didactique de la chimie étudient les capacités cognitives mises en œuvre par les étudiants en fonction des problèmes qui leur sont soumis (Tsaparlis & Angelopoulos, 2000 ; Tsaparlis & Zoller, 2003 ; Wood, 2006 ; Zoller, 2001, Zoller & Pushkin, 2007 ; Zoller & Tsaparlis, 1997). Par exemple Wood propose une classification des types de problèmes en fonction des données disponibles, des méthodes et des objectifs en jeu (fig. ✦13) ; cet auteur critique en particulier la place importante des problèmes fermés dont la résolution consiste à restituer une réponse attendue unique et assimilée par les étudiants, au détriment de problèmes plus ouverts qui nécessitent la recherche de la meilleure solution possible. Zoller & Tsaparlis (1997) souhaitent provoquer un glissement des problèmes (ou plutôt des exercices d'application) largement répandus et qui requièrent des capacités cognitives de faible niveau (Lower-Order Cognitive Skills ou LOCS), vers de véritables problèmes qui requièrent des capacités cognitives d'un niveau supérieur (Higher-Order Cognitive Skills ou HOCS).

FIGURE ✦ 13 **Une classification des types de problèmes (Wood & Sleet, 1993)**

Type	Data	Methods	Outcomes/goals	Skills bonus
1	Given	Familiar	Given	Recall of algorithm
2	Given	Unfamiliar	Given	Looking for parallels to known methods
3	Incomplete	Familiar	Given	Analysis of problems to decide what further data are required
4	Incomplete	Unfamiliar	Given	Weighing up possible methods and deciding on data required
5	Given	Familiar	Open	Decision about appropriate goals; exploration of knowledge networks
6	Given	Unfamiliar	Open	Decision about goals and choice of appropriate methods; exploration of knowledge and technique networks
7	Incomplete	Familiar	Open	Once goals have been specified by the student, they are seen to be incomplete
8	Incomplete	Unfamiliar	Open	Suggestions of goals and methods to get there

FIGURE ✦13
Wood (2006) reprend ici (p. 99) une classification des types de problèmes élaborée antérieurement (Wood & Sleet, 1993). Les problèmes fréquemment rencontrés sont des types 1 et 2. Les problèmes des types 3 à 8 sont plutôt des travaux d'investigation nécessitant certaines capacités. Les objectifs ne sont pas nécessairement clairs au début, les méthodes ne sont pas systématiquement familières, les données peuvent être incomplètes. Les étudiants doivent alors élaborer des solutions par un travail expérimental ou/et par une recherche bibliographique.

Tsaparlis & Angelopoulos (2000) s'intéressent à la validité du modèle de résolution de problèmes de Johnstone – El-Banna appliqué aux problèmes de synthèse organique. Ils montrent la corrélation entre la capacité de mémoire de travail effective des étudiants (évaluée par des tests psychométriques) et la demande de chaque problème posé (c'est-à-dire le nombre maximal d'étapes et de processus nécessaires pour réussir). Ils montrent aussi que la validité de cette corrélation dépend d'autres paramètres tels que la nouveauté d'un problème pour les étudiants (et non des algorithmes appris) ou la capacité des étudiants à s'affranchir du contexte (indépendance du champ).

La résolution d'un problème implique une relation complexe entre le problème et chaque étudiant. Nous empruntons à la psychologie ergonomique les notions de tâche et d'activité. Nous définissons la tâche comme le but à atteindre dans des conditions déterminées ; elle peut être décrite de différentes manières et de façon plus ou moins explicite, ce qui en modifie sa réalisation (Leplat & Hoc, 1992). Confronté à la tâche prescrite l'individu l'interprète en fonction des moyens dont il dispose et des contraintes qu'il se fixe : la tâche redéfinie et sa réalisation (tâche effective) peuvent être différentes de la tâche prescrite (Rabardel *et al.*, 2007).

Il est en outre nécessaire de distinguer la tâche, centrée sur ce qui arrive aux choses (états, changements d'état, transformations, etc.) de l'activité, qui est centrée sur ce que fait l'individu (son fonctionnement, ses intentions, ce qui est significatif pour lui) (Rabardel *et al.*, 2007). L'activité de l'individu est en partie observable lorsqu'elle s'applique à des objets matériels mais lorsqu'elle est intellectuelle on n'en perçoit que le résultat final (comme le déplacement d'une pièce au jeu d'échecs) (Leplat & Hoc, 1992).

Les caractéristiques des individus et des situations étant diverses et variables, une même tâche peut conduire à des activités très différentes (Rabardel *et al.*, 2007). Pour un individu donné c'est le coût d'une activité (fatigue, satisfaction, confort, etc.), en particulier le coût cognitif pour une activité intellectuelle, qui peut expliquer le choix d'une stratégie par rapport à une autre (Leplat, 1992). Ainsi l'activité effective de l'individu face à une tâche prescrite peut être très différente de l'activité attendue par le prescripteur de la tâche.

En conclusion, il s'agit non seulement d'évaluer l'adéquation entre modèles et tâches assignées aux étudiants, mais aussi d'étudier pour chaque tâche les différentes stratégies de réalisation possibles et leur coût relatif pour l'étudiant.

Nous arrivons donc à notre question de recherche que nous présentons ci-dessous avec notre hypothèse. Puis nous décrivons la méthodologie que nous mettons en œuvre pour obtenir des éléments de réponse.

2. Les étudiants peuvent-ils raisonner plutôt que mémoriser-restituer ? Question et hypothèse de recherche

Nous souhaitons comprendre le décalage apparent entre points de vue des enseignants et des étudiants concernant les capacités cognitives à mettre en œuvre en chimie organique : les étudiants privilégient la mémorisation au détriment des raisonnements fondés sur les modèles de la réactivité chimique. L'activité attendue par les enseignants est donc différente de l'activité effective des étudiants. Nous nous posons la question suivante.

Q	Les étudiants peuvent-ils mettre en œuvre une stratégie de modélisation plutôt qu'une stratégie de mémorisation - restitution ?

Nous nous intéressons plus particulièrement à la relation entre les tâches prescrites par les enseignants (pour être réalisées par les étudiants) et les modèles enseignés en chimie organique. Nous avons vu que selon la nature d'une tâche, celle-ci peut conduire chez les étudiants à la mobilisation de capacités de plus ou moins haut niveau cognitif. En outre une même tâche peut être interprétée différemment selon l'individu : si les enseignants voient peut-être dans les tâches qu'ils donnent aux étudiants la nécessité de mettre en œuvre une stratégie de modélisation, les étudiants quant à eux ne semblent voir aucune autre stratégie possible que celle de la mémorisation-restitution.

Nous avons vu qu'un modèle est efficace pour un champ questionnemental, ce dernier incluant les situations explorables et les questions qui peuvent être traitées par le modèle (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Si la tâche prescrite par l'enseignant n'est pas définie (but/conditions) en adéquation avec le champ questionnemental, le modèle est alors inefficace pour permettre la réalisation de la tâche selon une stratégie de modélisation. La question de la bonne définition d'une tâche est pour nous une condition nécessaire mais pas suffisante à la résolution d'un problème par une stratégie de modélisation. La deuxième condition concerne le rapport bénéfice / coût cognitif des stratégies de réalisation des tâches prescrites. Dans le cas de tâches définies en adéquation avec le champ questionnemental d'un modèle, est-il plus intéressant pour les étudiants d'utiliser la

stratégie de mémorisation-restitution (rendue difficile par le très volumineux contenu disciplinaire de ce cours) plutôt que l'utilisation des modèles ?

Enfin il semble que la structuration globale des contenus en chimie organique soit omniprésente au cours des premières années universitaires (voir chapitre I-1) : il s'agit de la structuration descriptive (dite par fonction) héritée de l'histoire. Il nous faut d'abord le vérifier en ce qui concerne cet enseignement en France avant d'en étudier la pertinence. En effet nous pensons que la plupart des tâches prescrites requièrent en premier lieu de reconnaître un groupe fonctionnel (associé éventuellement à quelques conditions expérimentales) avant de permettre la restitution de réactions ou de mécanismes réactionnels génériques partant de cette fonction. En outre si les fonctions sont classées en augmentant progressivement la complexité de leur structure (des alcanes aux composés polyfonctionnels) la progressivité en termes de modèles n'emprunte par forcément la même voie.

H

Nous faisons l'hypothèse que la nature de la plupart des tâches prescrites par les enseignants ainsi que la structuration du savoir à enseigner favorisent une stratégie de mémorisation-restitution au détriment d'une stratégie de modélisation.

3. Méthodologie

Nous cherchons à apporter des éléments de réponse à la question précédente et à vérifier l'hypothèse. Pour cela nous constituons un matériau d'analyse que nous décrivons ci-dessous et que nous analysons selon différentes lignes directrices.

3.1. Un corpus représentatif des connaissances et compétences à acquérir (du bac à bac+2)

Nous constituons un corpus qui nous semble être suffisamment représentatif et caractéristique de cet enseignement en France sans nécessairement chercher à être exhaustif. Ce matériau est constitué de programmes d'enseignement (ou de référentiels), d'énoncés d'examens et de concours, ainsi que de livres de chimie organique du niveau considéré.

3.1.1. Programmes d'enseignement

Nous avons collecté 12 programmes d'enseignement (cf. annexes, CD-ROM) :

- le référentiel du BTS Chimiste (1997) ;
- le Programme Pédagogique National du DUT Chimie (2005) ;
- les programmes de Classes Préparatoires aux Grandes Écoles, voies PCSI-PC (2003 & 2004) et BCPST (2003 & 2004);
- le contenu de licences de chimie de différentes universités : Bordeaux (récupéré en 2009), Clermont-Ferrand (2006), Grenoble (2009), Montpellier (2009), Paris 7 (2009), Paris-Est (2007), Paris-Sud (2009) et Strasbourg (2009).

3.1.2. Énoncés d'examens et de concours

Nous utilisons aussi 12 énoncés d'épreuves (cf. annexes, CD-ROM) :

- du BTS Chimiste, sessions 2007 et 2008 ;
- de concours d'accès aux Grandes Écoles : Concours Communs Polytechniques (2007), E3A (2007), ENS (2007), Mines-Ponts (2007) ;
- de licences de chimie : Clermont-Ferrand (2006, 2007), Grenoble (2007, 2007) et Paris-Sud (2008, 2009).

Nous avons choisi des examens et concours diversifiés mais sur une période courte, afin d'obtenir une image assez représentative des tâches demandées aux étudiants à une période donnée en chimie organique. Il ne nous a pas été possible d'obtenir des énoncés d'examen du DUT Chimie.

3.1.3. Livres de chimie organique du niveau enseigné

Nous utilisons aussi 20 livres de chimie organique disponibles en langue française et qui visent notamment les étudiants de CPGE, STS, IUT ou Licence : Amigoni *et al.* (2004) ; Arnaud *et al.* (2004) ; Clayden *et al.* (2003) ; Depovere (2005) ; Descodts (1994) ; Durupthy (2003) & Durupthy (1997) (que nous considérons comme les deux volumes d'un même ouvrage couvrant les 2 années de CPGE PCSI-PC) ; Grécias (2004) ; Hart & Conia (1997) ; Johnson (2003) ; Krausz *et al.* (1999) ; Lacaze *et al.* (2006) ; Lalande (1997) ; Le Corre *et al.* (2000) ; McMurry (2003) ; Mercier & Godard (1995) ; Mesplède (2004) ; Milcent (2007) ; Rabasso (2006) ; Solomons & Fryhle (2000) ; Vollhardt & Schore (1999). Nous considérons pour chacun le sommaire et éventuellement son descriptif par les auteurs ou l'éditeur. Des extraits de ces livres sont disponibles en annexe (cf. CD-ROM).

3.2. Lignes d'analyse du corpus

Nous analysons la nature des tâches soumises aux étudiants lors des examens et des concours, afin d'inférer les stratégies de réalisation de ces tâches et leur coût cognitif. Puis nous caractérisons la structuration globale du savoir à enseigner dans les programmes et les livres d'enseignement, avant d'en analyser la pertinence par rapport aux tâches proposées aux étudiants et aux stratégies de réalisation.

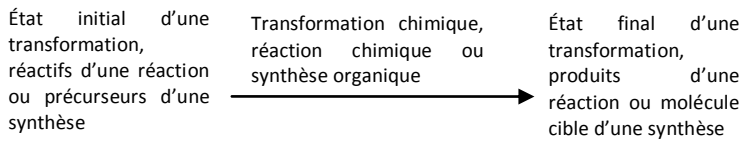
3.2.1. Décrire les tâches soumises aux étudiants lors d'examens et de concours

Dans un premier temps nous caractérisons les tâches soumises aux étudiants lors d'examens ou de concours. Elles constituent des indicateurs pertinents à différents titres. Ces tâches sont nécessairement présentes parmi d'autres dans un enseignement qui vise à préparer l'examen (BTS, licence) ou le concours (des grandes écoles). Elles offrent une représentation de ce qui est considéré comme important pour les auteurs de sujets d'examen et de concours, parmi lesquels figurent des professeurs et des concepteurs de programmes d'enseignement. A partir de ces tâches nous pouvons inférer les stratégies dont cet enseignement vise la construction et l'intégration par les étudiants. Enfin les résultats de cette analyse nous seront utiles dans la troisième partie de notre travail lorsque nous étudierons ce qui détermine l'activité des professeurs de chimie organique.

Nous avons construit une grille d'analyse des tâches en conciliant deux approches : l'une est une approche inductive qui part des données elles-mêmes, l'autre est issue de notre cadre théorique. L'approche inductive nous a conduit à confronter les énoncés d'examens et de concours aux objectifs principaux affichés dans les programmes d'enseignement de la chimie organique (nous décrivons succinctement ces derniers au chapitre II-2). L'approche issue de notre cadre théorique présente deux dimensions d'analyse a priori indépendantes : dans la première nous tentons de repérer dans les sujets d'énoncés et de concours les tâches au sens de Leplat & Hoc (1992), à savoir des buts à atteindre dans des conditions données ; pour la seconde nous nous intéressons à la possibilité de mise en œuvre de stratégies de modélisation, donc nous recherchons dans les énoncés des données pouvant être utiles au fonctionnement des modèles. La détermination de la nature de telles données provient d'une analyse du fonctionnement des modèles de la réactivité que nous présentons aussi dans le chapitre II-2.

La figure ✦14 présente la catégorisation les tâches en fonction de leurs buts et des conditions de leur réalisation. Nous nous limitons aux tâches qui visent la vérification de la compréhension de la réactivité en chimie organique. Nous distinguons trois types de tâches en fonction de leurs buts : les tâches de type I ou I' ont un but qui concerne l'état

FIGURE ✦ 14 **Grille d'analyse des tâches en fonction des buts et des conditions**



Le but porte sur :	I ou I'	II ou II'	III ou III'
Une des conditions concerne :	1	2	3

Typologie des tâches en fonction de leurs buts	
0	*Toutes les tâches dont le but n'est pas la réactivité en chimie organique : autres domaines de la chimie, structure d'espèces chimiques, tests caractéristiques visant à connaître une structure, techniques expérimentales…*
I	Proposer des réactifs (avec éventuellement les conditions expérimentales à mettre en œuvre) ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible.
I'	Autres tâches dont le but concerne l'état initial d'une transformation chimique, les réactifs d'une réaction chimique.
II	Fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel.
II'	Autres tâches dont le but concerne la ou les transformation(s) chimique(s) d'une synthèse organique, les réactions chimiques.
III	Déterminer la formule d'une espèce chimique organique cible dans une synthèse organique.
III'	Autres tâches dont le but concerne l'état final d'une transformation chimique, les produits d'une réaction chimique, les sous-produits de la synthèse organique.
Typologie des tâches en fonction des conditions de leur réalisation	
1	Indications sur l'état initial de la transformation, les réactifs de la réaction, les espèces chimiques à mettre en œuvre dans la synthèse.
2	Indications sur la transformation chimique, la réaction chimique, la synthèse.
3	Indications sur l'état final de la transformation, les produits de la réaction, la cible de la synthèse.

FIGURE ✦14

Le tableau présente la première grille d'analyse utilisée pour catégoriser les tâches prescrites aux étudiants par les auteurs des sujets d'examen et de concours. Chaque tâche est catégorisée en fonction de son but principal et des conditions de réalisation de la tâche.

initial d'une transformation chimique, d'une synthèse ou les réactifs d'une réaction chimique, les tâches de type II ou II' concernent les transformations chimiques d'une synthèse organique, les réactions chimiques et les mécanismes réactionnels, enfin les tâches de type III ou III' concernent l'état final d'une transformation chimique, d'une synthèse ou les produits d'une réaction chimique. Les tâches I, II et III sont les tâches qui nous intéressent particulièrement car elles concernent les réactifs à mettre en œuvre dans une synthèse (I), les éléments de mécanismes réactionnels (II) et le produit obtenu grâce à une synthèse organique (III). Les tâches I', II' et III' regroupent les autres tâches traitant de la réactivité en chimie organique. Ensuite nous catégorisons les conditions de réalisation des tâches selon qu'elles touchent à l'état initial, les réactifs (1), la transformation, la réaction ou la synthèse (2) ou l'état final, les produits, la cible de la synthèse (3).

La figure 15 présente la deuxième dimension d'analyse, à savoir les données utiles au fonctionnement des modèles de la réactivité.

FIGURE ✦ 15 **Grille d'analyse en fonction des données utiles à la modélisation**

Nature des données	
b	Formule brute d'une espèce chimique organique
c	Données cinétiques (loi de vitesse, influence d'un catalyseur, énergie d'activation, constante de vitesse, etc.)
e	Structure d'une espèce chimique (nom, formule plane, éléments sur sa constitution, fonction)
p	Proportions dans le cas de mélanges (produit majoritaire, pourcentages, etc.)
q	Données issues de la chimie quantique (OM, leurs coefficients et énergies, etc.)
s	Données expérimentales donnant des indications structurelles sur une espèce chimique organique inconnue (spectroscopie, test caractéristiques, réactions suivantes, etc.)
t	Données thermodynamiques (énergies, enthalpies, constantes d'équilibres, potentiels standards, électronégativité, etc.)
z	Autres indications : constante diélectrique, longueur de liaison, rayon atomique, rendement, numéro atomique, etc.

FIGURE ✦15
Le tableau présente la 2nde grille d'analyse utilisée pour caractériser les tâches prescrites aux étudiants par les auteurs des sujets d'examen et de concours. Il s'agit de repérer la présence et la nature de données utiles au fonctionnement des modèles de la réactivité.

Nous utilisons une nomenclature intégrant ces deux dimensions d'analyse. Par exemple une tâche étiquetée « II-1e2ct3 » est une tâche dont le but concerne les éléments d'un mécanisme réactionnel (II), avec des informations sur les réactifs (1), la réaction elle-même (2) et les produits (3). En outre certaines données utiles au fonctionnement des modèles de la réactivité sont précisées : structure d'une espèce chimique initiale (1e), données cinétiques et thermodynamiques sur la réaction (2ct).

La place d'une tâche dans un énoncé doit être prise en compte pour la catégoriser. En effet les réponses aux questions précédentes constituent des données utilisables pour réaliser une tâche. Lorsque deux tâches sont contenues dans la même question (déterminer la formule des produits et proposer un mécanisme réactionnel par exemple), nous n'envisageons pas d'antériorité de l'une par rapport à l'autre excepté en présence d'un indicateur de la chronologie : présence de termes ou de structures telles que « puis » ou « après avoir donné la formule […] proposer un mécanisme », étiquetage des espèces chimiques laissant supposer un ordre (A, B, C ou 1, 2, 3…), etc.

Il faut noter la grande disparité entre énoncés en ce qui concerne la durée de l'épreuve et le nombre de tâches (de 7 tâches dans l'énoncé de Licence de Grenoble Mai 2007, à 75 tâches dans l'énoncé du concours des ENS 2007).

3.2.2. Inférer les stratégies de réalisation de ces tâches et en évaluer le coût cognitif

Après avoir décrit les principaux types de tâches, nous inférons les stratégies de réalisation de ces tâches utilisant les modèles de la réactivité en chimie organique. Pour ce faire nous utilisons l'éclairage des programmes d'enseignement, de livres de chimie organique destinés à des niveaux supérieurs (essentiellement Anslyn & Dougherty (2006), Carey & Sundberg (1996), Carey & Sundberg (1997), Drouin (2005), Smith & March (2007), Vogel (1997)), ainsi que les résultats de l'analyse épistémologique de Loumouamou (1998). Nous envisageons deux cas limites : la stratégie de modélisation qui articule modèles et champs empiriques, et la stratégie de mémorisation-restitution d'éléments empiriques ou théoriques. Enfin nous discutons du coût que représentent ces stratégies pour les étudiants. Nous gardons à l'esprit que les procédures effectivement mises en œuvre par les étudiants peuvent être beaucoup plus complexes car constituées par des allers-retours entre les deux stratégies envisagées a priori, ou par d'autres stratégies que notre analyse a priori ne nous a pas permis d'identifier.

Nous sommes conscients que les situations d'évaluation sommative (examens ou concours) et les situations d'enseignement-apprentissage (pendant le cours ou liées au cours) sont différentes, ce qui constitue un biais dans nos analyses. En outre les situations d'évaluation sommative sont différentes entre elles : par exemple les sujets d'examen ou de concours peuvent être élaborés soit par le professeur lui-même soit par un professeur inconnu des étudiants n'enseignant pas forcément dans les formations concernées (par exemple des professeurs de grandes écoles n'enseignant pas dans les CPGE). Par conséquent la nature du contrat didactique[1] (Brousseau, 1998) est très différente selon la situation d'évaluation, ce qui influe sur les stratégies possibles ou leur mise en œuvre pour réussir l'examen ou le concours.

[1] Dans la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1998), le contrat didactique régit le fonctionnement de la situation didactique. *« Dans une situation d'enseignement, préparée et réalisée par un maître, l'élève a en général pour tâche de résoudre le problème (mathématique) qui lui est présenté, mais l'accès à cette tâche se fait à travers une interprétation des questions posées, des informations fournies, des contraintes imposées qui sont des constantes de la façon d'enseigner du maître. Ces habitudes (spécifiques) du maître attendues par l'élève et les comportements de l'élève attendus par le maître, c'est le contrat didactique »*. (Brousseau, 1980, p. 181).

3.2.3. Caractériser la structuration globale du savoir à enseigner et en analyser la pertinence

Nous caractérisons la structuration globale des contenus dans les programmes d'enseignement et les livres de chimie organique du bac jusqu'à bac+2. Comme précédemment nous nous limitons à la partie de la chimie organique dont le but premier est l'étude de la réactivité des espèces chimiques, ainsi nous ne prenons pas en considération la partie qui traite de la structure des espèces chimiques organiques.

Nous avons élaboré une grille d'analyse en nous fondant d'une part sur les structurations de contenu mentionnées dans notre constat bibliographique initial (chapitre I-1) et d'autre part sur une étude préliminaire du corpus (programmes d'enseignements et sommaires des livres de chimie organique). Nous avons ainsi retenu 3 catégories complémentaires :
- structuration par famille d'espèces chimiques, par fonction ;
- structuration par type de réaction, par mécanisme réactionnel ;
- structuration mixte (par fonction / par type de réaction).

Nous ajoutons une catégorie qui peut se superposer aux trois précédentes :
- la présence d'un chapitre préliminaire visant à présenter des modèles de la réactivité en chimie organique.

Enfin nous étudions la pertinence de la structuration prédominante par rapport aux tâches proposées aux étudiants et aux stratégies de réalisation étudiées précédemment. Il s'agit avant tout de déterminer si une structuration encourage une stratégie, en particulier une stratégie de mémorisation-restitution au détriment d'une stratégie de modélisation.

Chapitre II-2

Résultats de l'analyse du savoir à enseigner

1. Les principaux objectifs affichés dans les programmes d'enseignement

Ce paragraphe préliminaire présente une analyse des principaux objectifs exposés dans les programmes d'enseignement, celle-ci ayant contribué à la construction de la grille d'analyse de tâches décrite à la figure ✦14 (chapitre II-1).

FIGURE ✦ 16 **Principaux objectifs de formation en chimie jusqu'à bac+2**

Objectifs principaux	Occurrences				
	STS (N=1)	IUT (N=1)	CPGE (N=2)	Licences (N=8)	**Total (N=12)**
Acquérir une solide formation scientifique de base à la fois généraliste et approfondie	1	0	1	8	**10**
Comprendre la place de la chimie contemporaine au carrefour d'autres disciplines et ses applications dans la société	1	1	2	5	**9**
Développer des compétences du scientifique (démarches scientifique et expérimentale, attitude scientifique, résolution de problèmes, communiquer)	1	1	2	5	**9**
Se préparer à la suite (poursuite d'études, insertion professionnelle)	1	1	0	5	**7**

FIGURE ✦16
Ce tableau synthétise les quatre principaux objectifs de formation en chimie tels qu'ils sont exposés dans les programmes des STS préparant au BTS Chimiste, des IUT préparant au DUT Chimie, des CPGE et des Licences de Chimie.

Les auteurs des programmes d'enseignement de la chimie affichent des objectifs de nature variée. Parmi ceux-ci nous dégageons quatre principaux objectifs récurrents (fig. ✦16) : acquérir une solide formation de base, comprendre la place de la chimie

contemporaine, développer des compétences du scientifique, et se préparer à la suite (poursuite d'études, intégration professionnelle). L'enseignement supérieur de la chimie se veut donc en phase avec la nature et les enjeux actuels de la chimie.

En se référant à Normant (2003) et Laszlo (1993), cités ci-dessous, la synthèse d'espèces chimiques organiques est un domaine incontournable de la chimie organique contemporaine. Ce domaine met en jeu tous les aspects de la chimie, en particulier des modèles de nature diverse. L'extrait du sommaire de *The Journal of Organic Chemistry* illustre ces aspects (fig. ✦17)

> *« La synthèse organique est certainement le domaine clé de la chimie organique, et le plus envoûtant par ses perspectives sans fin de création. Son nom est en fait équivoque aujourd'hui, car si le but ultime est de créer une molécule organique, la démarche implique toutes les facettes de la chimie : théorique, physique, analytique, inorganique… Toutes concourent à l'élaboration d'un enchaînement carbone-carbone, fonctionnalisé, avec toutes les géométries locales souhaitées par l'artiste. »*
>
> *Normant, 2003, p.5*
>
> *« Ce livre vise à présenter en un format concis les bases élémentaires de la chimie organique. On y trouve ce qu'il suffit de connaître pour suivre et apprécier l'élégance d'une synthèse multi-étapes d'une substance naturelle complexe telle qu'une hormone stéroïde ou un antitumoral. L'ouvrage est centré sur des concepts directement opératoires : ceux d'activation, de protection-régénération, de contrôles cinétique et thermodynamique, de contrôles orbitalaire et de charge, de choix du solvant et des autres conditions de réaction par exemple. »*
>
> *Laszlo, 1993, quatrième de couverture.*

En prônant un enseignement de la chimie organique contemporaine nous visons par conséquent l'acquisition de notions en synthèse organique et l'utilisation de modèles de la réactivité. Nous avons recherché ces deux thèmes dans les objectifs donnés par les concepteurs des programmes d'enseignement supérieur de la chimie : il s'agit indistinctement d'objectifs placés en tête du programme d'enseignement, en tête de la partie chimie ou plus particulièrement dans la partie chimie organique. Les programmes sont rédigés de manière inégale mais nous retrouvons dans la plupart d'entre eux (fig. ✦18) la présence d'objectifs liés à la synthèse organique et aux modèles. C'est le programme de 1ère année PCSI qui offre la description la plus précise des objectifs liés à ces deux thèmes :

> *« Cette étude a pour objectif principal l'initiation à la synthèse organique. La nomenclature des composés étudiés est donnée. Le plus souvent, on débute par des constatations expérimentales que l'on interprète à l'aide de modèles (mécanismes limites par exemple). On pourra évoquer le postulat de Hammond dans le cadre d'un contrôle cinétique. On utilise (sans justification) la caractérisation de quelques groupes fonctionnels »*
>
> *Programme de 1ère année PCSI, 2003, p. 1321 (annexes, CD-ROM)*

FIGURE ✦ 17 **Extrait du sommaire du JOC (2009, 74, 10)**

1. Electron Relay Race in Peptides
2. Suzuki–Miyaura Cross-Coupling Reactions of Primary Alkyltrifluoroborates with Aryl Chlorides
3. Synthesis of Carbocyclic Aromatic Compounds Using Ruthenium-Catalyzed Ring-Closing Enyne Metathesis
4. Phenol-Based Lipophilic Fluorescent Antioxidant Indicators: A Rational Approach
5. Synthesis of a Carboxylate Functionalized Bis-Amino Acid Monomer
6. Disparate Behavior of Carbonyl and Thiocarbonyl Compounds: Acyl Chlorides vs Thiocarbonyl Chlorides and Isocyanates vs Isothiocyanates
7. Molecular Dynamics and Docking Studies of Single Site Esterase Peptide Dendrimers
8. General, Mild, and Intermolecular Ullmann-Type Synthesis of Diaryl and Alkyl Aryl Ethers Catalyzed by Diol–Copper(I) Complex†
9. The Scope and Limitations of Intramolecular Nicholas and Pauson–Khand Reactions for the Synthesis of Tricyclic Oxygen- and Nitrogen-Containing Heterocycles
10. α-Fluorovinyl Weinreb Amides and α-Fluoroenones from a Common Fluorinated Building Block
11. Thionation of Mesoionics with Isothiocyanates: Evidence Supporting a Four-Step Domino Process and Ruling Out a [2 + 2] Mechanism
12. Fluorous Effects in Amide-Based Receptors for Anions
13. V-Shaped 4,6-Bis(arylvinyl)pyrimidine Oligomers: Synthesis and Optical Properties
14. Stable Right- and Left-Handed Peptide Helices containing Cα-Tetrasubstituted α-Amino Acids
15. Lack of Visible Chromophore Development in the Pulse Radiolysis Oxidation of 5,6-Dihydroxyindole-2-carboxylic Acid Oligomers: DFT Investigation and Implications for Eumelanin Absorption Properties
16. Intramolecular Hydrogen Bond-Controlled Prolyl Amide Isomerization in Glucosyl 3′(S)-Hydroxy-5′-hydroxymethylproline Hybrids: Influence of a C-5′-Hydroxymethyl Substituent on the Thermodynamics and Kinetics of Prolyl Amide Cis/Trans Isomerization
17. Toward Asymmetric Aldol-Tishchenko Reactions with Enolizable Aldehydes: Access to Defined Configured Stereotriads, Tetrads, and Stereopentads
18. Reaction of Glycidyl Methacrylate at the Hydroxyl and Carboxylic Groups of Poly(vinyl alcohol) and Poly(acrylic acid): Is This Reaction Mechanism Still Unclear?

FIGURE ✦17

The Journal of Organic Chemistry est présenté par ses éditeurs comme la première revue internationale de chimie organique en termes de citations, avec un Impact Factor de 3.952 en 2008. Cet extrait du numéro 74(10) de 2009 illustre la place importante de la synthèse organique et l'utilisation de modèles scientifiques.

FIGURE ✦ 18 **Objectifs liés à la synthèse organique et aux modèles**

Objectifs d'apprentissages	Occurrences				
	STS (N=1)	IUT (N=1)	CPGE (N=2)	Licences (N=8)	**Total (N=12)**
Être formé à la synthèse organique ou à la rétrosynthèse. Mettre en œuvre une synthèse organique et/ou la concevoir.	1	1	1	5	**8**
Savoir articuler expérience et théorie ; utiliser des modèles pour interpréter et prévoir	1	1	1	5	**8**

FIGURE ✦18

Ce tableau montre la place de la synthèse organique et des modèles dans les programmes des STS préparant au BTS Chimiste, des IUT préparant au DUT Chimie, des CPGE et des Licences de Chimie

Une partie de l'enseignement supérieur de la chimie organique aborde les thèmes de la synthèse organique et des modèles. Le traitement de ces thèmes prend bien entendu une coloration différente selon les objectifs et les caractéristiques propres à chaque formation (STS, IUT, CPGE, licences). Nous nous attendions donc à retrouver ces thèmes dans les énoncés d'examen et de concours, c'est pourquoi nous les avons intégrés à notre grille d'analyse présentée au chapitre précédent (fig.✦14, chapitre II-1).

2. Les tâches soumises aux étudiants lors des examens et des concours

2.1. Description des tâches en fonction de leurs buts et des conditions de leur résolution

Nous décrivons dans ce paragraphe les tâches présentes dans les énoncés d'examens et de concours. Nous nous sommes limités aux tâches qui visent la vérification de l'apprentissage de la réactivité en chimie organique. Une tâche étant définie comme un but à atteindre dans des conditions données, nous avons tout d'abord réparti les tâches entre 6 catégories en fonction de leur but (fig. ✦19).

FIGURE ✦ 19 **Répartition des tâches dans chaque énoncé**

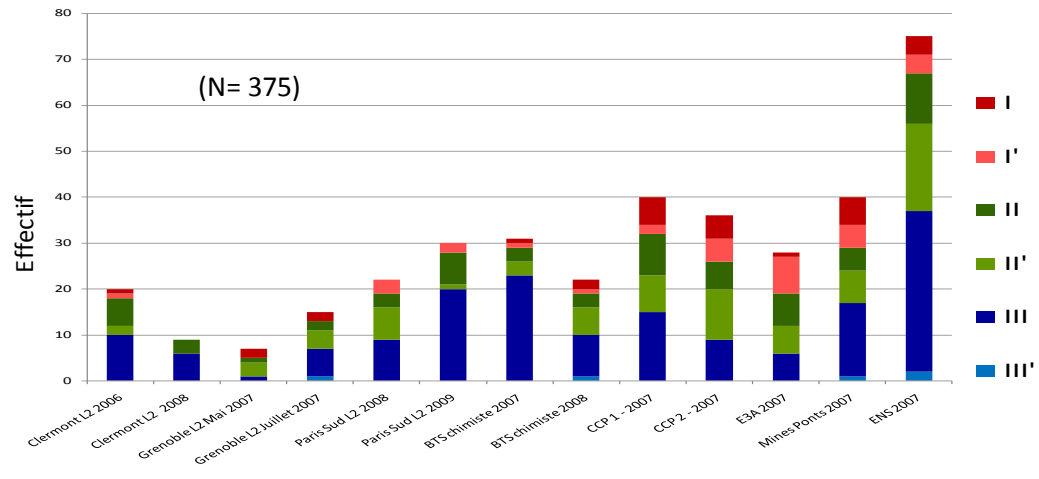


FIGURE ✦19

Tâches du type I : proposer des réactifs ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible.

Tâches du type I' : autres tâches visant l'état initial d'une transformation, les réactifs d'une réaction.

Tâches du type II : fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel.

Tâches de type II' : autres tâches visant la (les) transformation(s) chimique(s) d'une synthèse, les réactions chimiques.

Tâches du type III : déterminer la formule d'une espèce chimique organique cible dans une synthèse organique.

Tâches du type III' : autres tâches visant l'état final d'une transformation chimique, les produits d'une réaction, les sous-produits d'une synthèse organique.

Nous constatons que selon l'énoncé, la répartition des tâches est différente. Cependant il apparaît une prédominance des tâches de type III, qui ont pour but de déterminer la formule de produits de synthèse organique. Ce sont les tâches majoritaires pour 10 des 13 énoncés. En représentant le nombre de tâches par catégorie sur l'ensemble des énoncés d'évaluation (examens ou concours) (fig. ✦20) nous constatons également que 44% des tâches sont de type III. Inversement les tâches de type I qui visent à proposer des réactifs ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible, ne représentent que 8% des tâches.

FIGURE ✦ 20 **Répartition des tâches sur l'ensemble des énoncés d'évaluation**

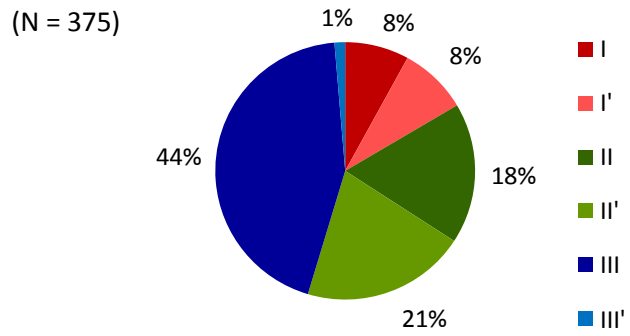


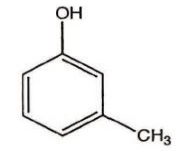
FIGURE ✦20
Tâches du type I : proposer des réactifs ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible.
Tâches du type I' : autres tâches visant l'état initial d'une transformation, les réactifs d'une réaction.
Tâches du type II : fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel.
Tâches de type II' : autres tâches visant la (les) transformation(s) chimique(s) d'une synthèse, les réactions chimiques.
Tâches du type III : déterminer la formule d'une espèce chimique organique cible dans une synthèse organique.
Tâches du type III' : autres tâches visant l'état final d'une transformation chimique, les produits d'une réaction, les sous-produits d'une synthèse organique.

Après ce rapide survol des données nous affinons l'analyse des tâches.

2.1.1. Tâches de type I : proposer des réactifs ou une synthèse pour préparer une espèce chimique cible

Les tâches de type I représentent seulement 8% du total des tâches d'évaluation (N=375). Elles sont cependant présentes dans 10 des 13 énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de proposer des réactifs (avec éventuellement d'autres conditions expérimentales) ou une synthèse pour préparer un produit fixé. Nous avons repéré trois sous-catégories en fonction des conditions observables de la réalisation de ces tâches.

Une tâche du type I-13 est telle que l'étudiant dispose d'une information partielle sur les espèces chimiques à utiliser et les conditions expérimentales (1) en plus de l'information sur le produit qu'on cherche à synthétiser (3) (fig.✦14, chapitre II-1). La tâche décrite dans l'exemple ci-dessous vise la synthèse du produit dont la formule est donnée, avec une indication sur l'un des réactifs à mettre en œuvre : le benzène. Il s'agit donc bien d'une tâche du type I-13.

> *« IV- (4 points) : A partir de benzène et de tout réactif nécessaire, **proposer une synthèse** du composé suivant :*
>
> 
>
>
> *».*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Grenoble (mai 2007)*

Nous mettons en évidence dans chacun des extraits les composantes de la tâche : nous soulignons et nous indiquons en caractère gras **son but**, et nous soulignons les conditions de réalisation de la tâche.

Pour une tâche de type I-123 l'étudiant dispose d'informations complémentaires sur la synthèse, la transformation chimique ou la réaction chimique (2): nature, nombre d'étapes, nom de la synthèse de référence, réaction utile, etc. La question 3.5 de l'extrait ci-dessous est un exemple de tâche classée comme I-123, les espèces chimiques O et R étant connues depuis la question 3.1 ainsi que la nature de la transformation (réduction du groupe carbonyle).

> *« La réduction sélective du groupe carbonyle de **O** donne **R**.*
> *[…]*
> *3.1. Donner les formules semi-développées des composés **I1** à S en complétant le tableau en annexe (page 9/9, à rendre avec la copie).*
> *[…]*
> *3.5. **Indiquer le nom et la formule d'un réactif susceptible de transformer O en R**. »*
>
> *Énoncé du BTS Chimiste (2007)*

Parmi les tâches de type I nous n'en avons trouvé qu'une seule de type I-3, c'est-à-dire ne fournissant que la formule de l'espèce chimique à synthétiser.

*« E.3.5. **Comment est synthétisé** le bromure de méthyltriphénylphosphonium ? »*

Énoncé du concours ENS - PC (2007)

Ainsi la quasi-totalité des tâches visant à synthétiser une espèce chimique fixée fournissent des éléments de réponse sur les réactifs et les conditions expérimentales à mettre en œuvre (fig. ✦21).

FIGURE ✦ 21 **Tâches du type I : proposer les réactifs d'une synthèse**

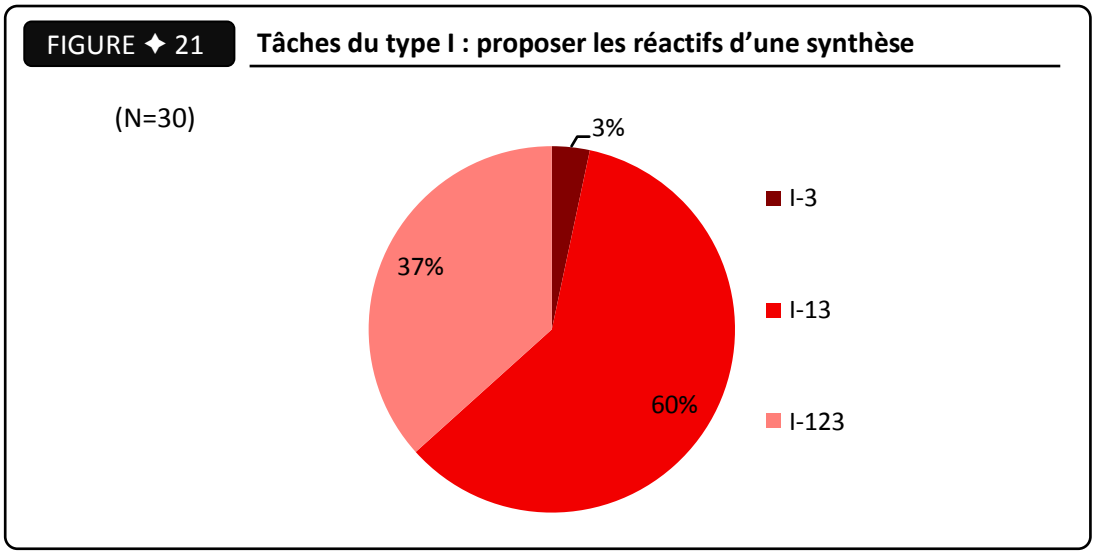


FIGURE ✦21

Les tâches de type I ont pour but de proposer les réactifs et/ou les conditions expérimentales pour préparer une espèce chimique cible.

Des conditions de la réalisation de ces tâches apparaissent dans les énoncés. Il s'agit d'indications sur les réactifs de la synthèse organique (1), sur les réactions ou la synthèse (2) et/ou sur les produits (3) de la synthèse organique.

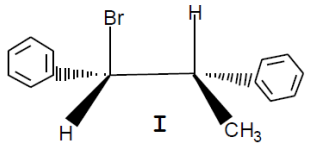
2.1.2. Tâches de types I' : autres tâches dont le but concerne l'état initial et les réactifs

Les tâches de type I' représentent seulement 8% du total des tâches (N=375). Elles sont cependant présentes dans 10 des 13 énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de répondre à des questions sur l'état initial d'une transformation chimique, les réactifs et les conditions expérimentales dans une synthèse : rôle d'une espèce chimique, nature des sites réactifs dans une espèce chimique, possibilité d'utilisation d'une autre espèce chimique, etc.

L'extrait ci-dessous montre un exemple de tâche I'-1 qui vise à déterminer le rôle d'une espèce chimique ($AlCl_3$) présente dans l'état initial.

> *« 4-Une réaction entre le benzène et le chlorométhane CH_3Cl en présence de chlorure d'Aluminium $AlCl_3$ conduit au composé P. Comment se nomme cette réaction. Donner son mécanisme et la structure du composé P.* ***Quel est le rôle de $AlCl_3$.*** *»*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Clermont-Fd (2006)*

Dans l'extrait suivant, la partie soulignée constitue une tâche de type I'-12 car la question porte sur une des espèces chimiques réactives, et l'étudiant dispose de la réponse à la question précédente qui constitue une information sur la réaction elle-même (mécanisme E2).

> *«Le composé I suivant est soumis à l'action d'une base forte non nucléophile et à chaud :*
>
> 
>
>
> *4.a A quel type de réaction a-t-on à faire ?*
> *4.b* ***Dessiner le composé I dans sa conformation réactive*** *(justifiez).*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université Paris-Sud (octobre 2008)*

Enfin la tâche mise en relief dans la question suivante est de type I'-123. En effet à travers l'énoncé et les questions précédant celle-ci, l'étudiant dispose d'informations sur l'état initial (formule de l'espèce chimique **17** connue, proportions), sur la réaction en jeu (mécanisme à la question D.10.2) et sur l'espèce chimique produite **18** (question D.10.1). La tâche correspondante est donc de type I'-123.

> *« D.10. Dans le tétrahydrofuranne anhydre, 4 moles de* ***17*** *réagissent avec 1 mole de tétrahydruroaluminate de lithium. Après hydrolyse,* ***18*** *est obtenu.*
> *D.10.1. Dessiner la formule de* ***18****.*
> *D.10.2. Détailler le mécanisme de formation de* ***18****.*
> *D.10.3.* ***Aurait-on pu utiliser de l'éthanol comme solvant ?*** *Justifier votre réponse. »*
>
> *Énoncé du concours ENS – PC (2007)*

Nous constatons que les tâches de type I' sont systématiquement associées à des informations sur l'état initial de la transformation chimique, sur les réactifs chimiques en présence (fig. ✦22).

FIGURE ✦ 22 **Tâches du type I' : autres tâches sur les réactifs**

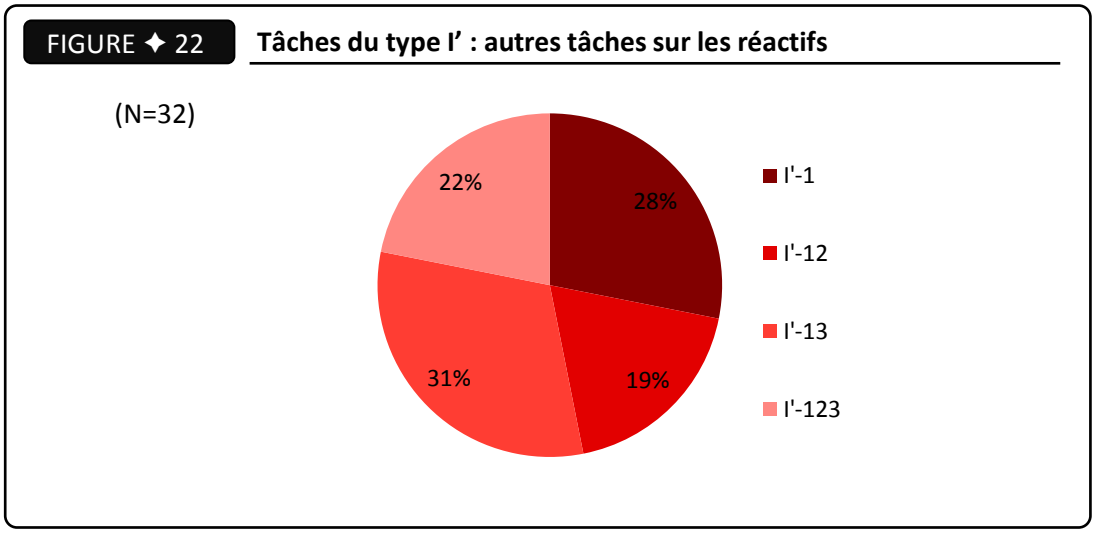


FIGURE ✦22
Les tâches de type I' sont les autres tâches visant l'état initial d'une transformation, les réactifs d'une réaction.
Des conditions de la réalisation de ces tâches apparaissent dans les énoncés. Il s'agit d'indications sur les réactifs (1), sur les réactions ou la synthèse (2) et/ou sur les produits (3).

2.1.3. Tâches de type II : proposer des éléments d'un mécanisme réactionnel

Les tâches de type II représentent 18% du total des tâches d'évaluation (N=375). Elles sont systématiquement présentes dans les énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel, que ce soit simplement d'en donner le nom, ou de proposer un morceau ou la totalité du mécanisme. Nous avons repéré quatre sous-catégories en fonction des conditions observables de la réalisation de ces tâches (fig. ✦23).

FIGURE ✦ 23 **Tâches du type II : fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel**

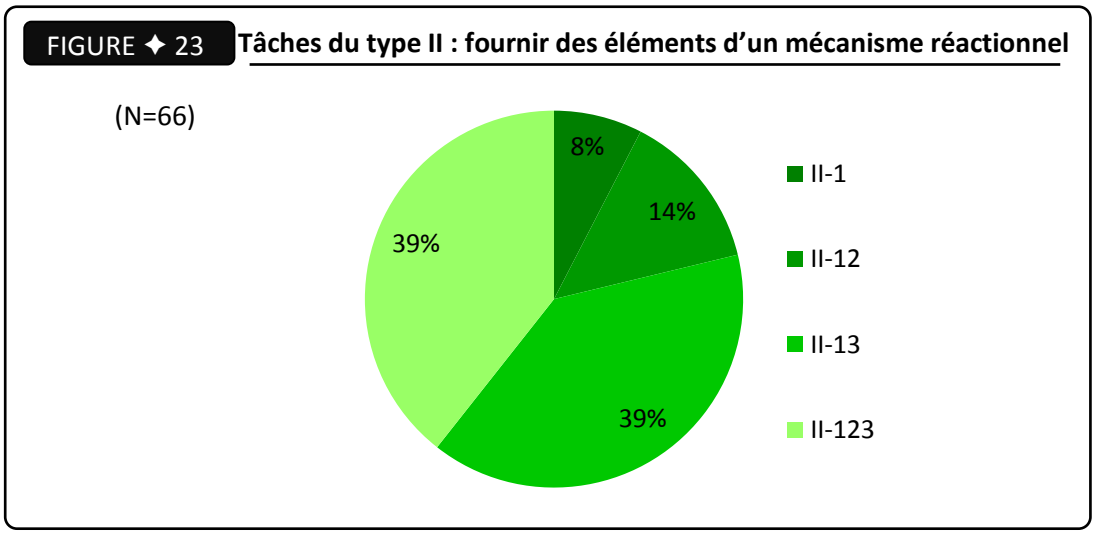
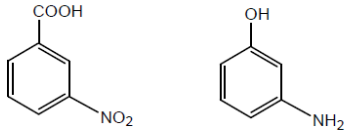


FIGURE ✦23
Les tâches de type II ont pour but de fournir des éléments d'un mécanisme réactionnel.
Des conditions de la réalisation de ces tâches apparaissent dans les énoncés. Il s'agit d'indications sur les réactifs (1), sur la réaction (2) et/ou sur les produits (3).

L'extrait ci-dessous présente une tâche de type II-1. Il s'agit pour l'étudiant de proposer un mécanisme réactionnel en ne connaissant que les réactifs. Nous considérons ici qu'en l'absence d'indicateur de chronologie entre les deux tâches présentes dans la question (déterminer la formule des produits et donner le mécanisme), ces deux tâches peuvent être traitées simultanément.

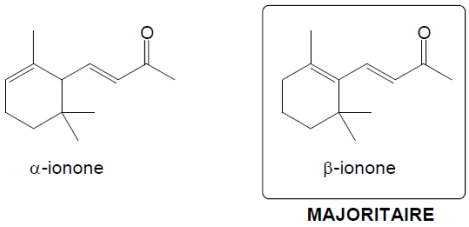
> *« III- Les composés A et B réagissent avec le brome en présence de chlorure d'Aluminium.*
>
> 
>
>
> **A** **B**
>
> *Quels seront les produits obtenus ? **Décrire le mécanisme** et justifiez votre réponse. »*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Clermont-Fd (2008)*

Une tâche de type II-13 figure dans l'extrait ci-dessous. L'étudiant a connaissance de la formule des réactifs (**12** a été trouvé précédemment), et il dispose d'indications sur le produit **13** via sa formule brute et sa transformation ultérieure en **14** (dont la formule plane a été donnée dans l'énoncé).

> *« 3.3 Le composé **12**, traité par une solution de LiBr dans le diméthylsulfoxyde (DMSO) conduit à **13**. Ecrire la structure de **13** ($C_{22}H_{25}BrO_7$). **Ecrire le mécanisme de la réaction**. Le composé **13** est transformé en composé **14** suivant des étapes non étudiées ici. »*
>
> *Énoncé des Concours Communs Polytechniques – PC – 1 (2007)*

Un dernier exemple est présenté ci-dessous. Il s'agit d'une tâche de type II-123. L'étudiant connaît les réactifs (α-citral, acétone et soude) ainsi que la nature de la réaction (aldolisation croisée), et il dispose d'informations sur le produit [C] (la formule a été trouvée à la question précédente, il se déshydrate en [D] qui peut se cycliser).

> *« La première étape de cette synthèse consiste en une réaction d'aldolisation croisée entre le α-citral [A] et l'acétone (ou propanone) en milieu basique ($Na^+ + HO^-$). L'analyse du milieu réactionnel met en évidence un nouveau composé [C], qui se déshydrate en un composé [D], appelé pseudo-ionone. Le composé [D] subit ensuite une réaction de cyclisation (qui ne sera pas étudiée ici) pour conduire à un mélange de α-ionone (minoritaire) et de β-ionone (majoritaire).*



2.1. Indiquer, dans le tableau en annexe, page 10/10, les formules semi-développées des molécules [C] et [D].
2.2. ***Détailler le mécanisme de la réaction d'aldolisation qui conduit à la formation de [C].*** *»*

Énoncé du BTS Chimiste (2008)

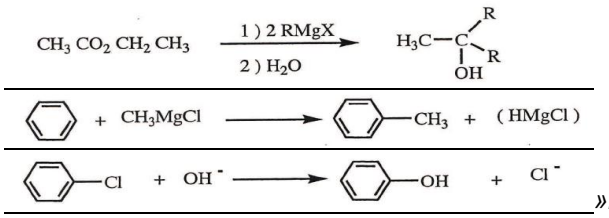
Nous constatons que dans 78% des tâches de type II l'étudiant dispose d'informations sur les produits de la réaction pour laquelle il doit proposer un mécanisme. Dans tous les cas il dispose d'informations sur les réactifs et les conditions expérimentales.

2.1.4. Tâches de types II' : autres tâches concernant les réactions

Les tâches de type II' représentent 21% du total des tâches (N=375). Elles sont présentes dans 12 des 13 énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de répondre à des questions sur les transformations chimiques dans une synthèse organique, les réactions chimiques elles-mêmes : écrire une équation de réaction (avec les espèces chimiques principales connues), indiquer le nom d'une réaction, expliquer le rôle d'une étape dans une synthèse organique (protection de fonction par exemple), discuter de la possibilité d'une réaction dans certaines conditions, expliquer une variation de vitesse, donner la définition de la stéréosélectivité, etc.

Par exemple la question suivante comporte 3 tâches du type II'-13.

« I- (3 points) : ***Les réactions suivantes sont-elles plausibles ou non ?*** *Justifier brièvement la réponse :*



».

Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Grenoble (mai 2007)

L'exemple suivant donne un autre exemple de tâche de type II'-13.

« Par action de l'acide nitrique sur un aldose, on oxyde simultanément la fonction aldéhyde et la fonction alcool primaire en fonctions acide. On dispose des informations suivantes au sujet d'un

aldopentose de la série D :

C	$\xrightarrow{HNO_3}$	D ($C_5H_8O_7$) optiquement inactif
C	$\xrightarrow{\text{Kiliani}}$	E + F (isomères de formule brute $C_6H_{12}O_6$)
E	$\xrightarrow{HNO_3}$	G ($C_6H_{10}O_8$) optiquement actif
F	$\xrightarrow{HNO_3}$	H ($C_6H_{10}O_8$) optiquement inactif

Décrire les différentes étapes de la synthèse de Kiliani. *[…] »*

Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Clermont-Fd (2006)

FIGURE ✦ 24 **Tâches du type II' : autres tâches sur les réactions**

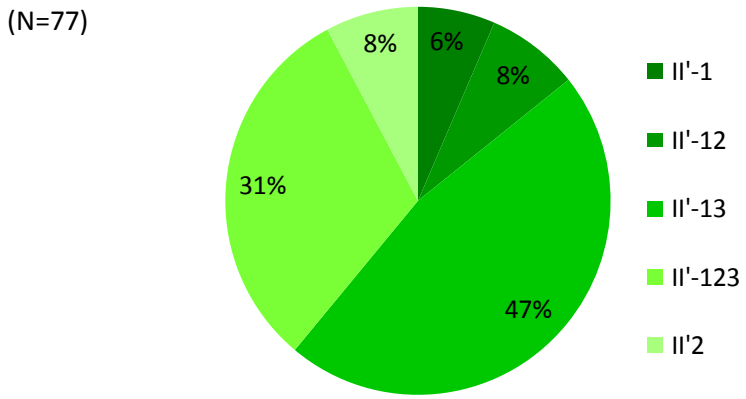
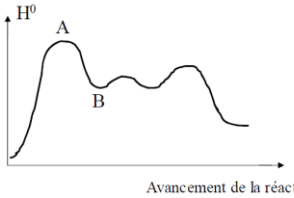


FIGURE ✦24

Les tâches de type II' sont les autres tâches concernant les transformations chimiques dans les synthèses, les réactions chimiques.
Des conditions de la réalisation de ces tâches apparaissent dans les énoncés. Il s'agit d'indications sur les réactifs (1), sur les réactions ou la synthèse (2) et/ou sur les produits (3).

Seulement 6 tâches de type II' ne fournissent pas d'indication sur les espèces chimiques réactives et les conditions expérimentales (fig. ✦24). Elles sont toutes de type II'-2. Il s'agit de donner la définition de la stéréosélectivité (concours commun Mines-Ponts, 2007), de donner un exemple de réaction de protection d'une fonction quelconque (CCP - 2, 2007) ou de savoir exploiter le profil énergétique d'une réaction. Ce dernier exemple est donné ci-dessous.

« Soit une réaction chimique dont le profil énergétique est donné ci-dessous



1.a ***Combien la réaction compte-t-elle d'étapes ?***

1.b ***Quelle est l'étape limitante ?***
1.c. ***La réaction est-elle endothermique ou exothermique ?***
1.d. ***Comment définissez-vous les points particuliers A et B du diagramme ?*** »

Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Paris-Sud (octobre 2008)

2.1.5. Tâches de type III : déterminer la formule d'une espèce chimique synthétisée

Les tâches de type III sont les plus présentes dans le corpus constitué des énoncés d'examens et de concours : elles représentent 44% des tâches (N=375) et elles sont systématiquement présentes dans les énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de déterminer le(s) produit(s) obtenu(s) lors d'une synthèse organique, ou des produits de réaction. Nous avons repéré quatre sous-catégories en fonction des conditions de la réalisation de ces tâches (fig. ✦25).

FIGURE ✦ 25 **Tâches du type III : déterminer la formule d'un produit de synthèse**

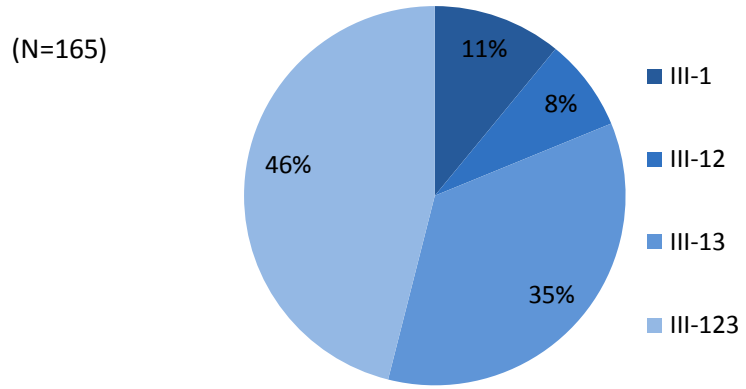


FIGURE ✦25
Les tâches de type III ont pour but de déterminer la formule d'un produit de synthèse organique, d'un produit de réaction.
Des conditions de la réalisation de ces tâches apparaissent dans les énoncés. Il s'agit d'éventuelles indications sur les réactifs (1), sur les réactions (2) et/ou sur les produits (3) de la synthèse organique.

« Le but-2-ène de configuration Z est traité par Cl_2 en présence d'une quantité équimoléculaire de bromure de sodium. ***Quel sera ou quels seront le(s) produit(s) de cette réaction ?*** *Justifiez votre réponse. Préciser leur(s) configuration(s) ? »*

Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Grenoble (mai 2007)

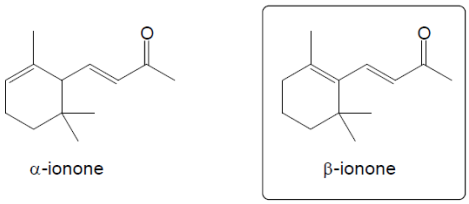
L'exemple précédent est une tâche de type III-1 car l'énoncé ne fournit que les réactifs et les conditions initiales. Si 18 tâches sont de ce type, la majorité des tâches de type III donne des précisions sur la synthèse, la réaction et/ou sur les produits. L'exemple ci-dessous présente une tâche de type III-123 car l'étudiant connaît certains réactifs et les conditions

expérimentales (but-2-yne, catalyseur empoisonné), la nature de la réaction (hydrogénation catalytique) et une indication sur le produit obtenu puisqu'il subit une ozonolyse dans l'étape suivante.

> *« I- a) Une hydrogénation catalytique est réalisée sur du but-2-yne en présence d'un catalyseur le charbon palladié empoisonné à l'acétate de plomb. **Quel sera le composé 1 obtenu ?** Précisez sa stéréochimie.*
> *b) Une ozonolyse est effectuée sur le composé 1. […] »*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Clermont-Fd (2008)*

2.1.6. Tâches de type III' : autres tâches dont le but concerne l'état final ou les produits

Les tâches de type III' représentent seulement 1% des tâches (N=375). Elles ne sont présentes que dans 4 des 13 énoncés. Il s'agit pour l'étudiant de répondre à des questions sur l'état final d'une transformation chimique, les produits dans une synthèse, en particulier sur la composition du mélange (un seul produit ? un mélange ?). Ces tâches sont du type III'-13 ou III'-123 comme dans le cas ci-dessous.

> *« […]. Le composé [D] subit ensuite une réaction de cyclisation (qui ne sera pas étudiée ici) pour conduire à un mélange de α-ionone (minoritaire) et de β-ionone (majoritaire).*
>
> 
>
>
> *2.1. Indiquer, dans le tableau en annexe, page 10/10, les formules semi-développées des molécules [C] et [D].*
> *[…]*
> *2.3. **Quelle particularité structurale pourrait expliquer que la β-ionone est obtenue majoritairement par rapport à la α-ionone ?** »*
>
> *Énoncé du BTS (2008)*

2.2. Présence de données utiles à la modélisation

Nous développerons au paragraphe 3 l'utilité de ces données pour la modélisation en chimie organique.

Nous constatons la présence écrasante de données concernant la structure des espèces chimiques réactives (nom, formule plane, éléments sur sa constitution, fonction) : ce sont les conditions de réalisation classées « 1e » : elles sont présentes dans 98% des tâches (N=375).

Quant aux informations sur les produits elles sont de nature diverse : 42% pour « 3e » (nom, formule plane, éléments sur sa constitution, fonction), 34% pour « 3s » (données expérimentales donnant des indications structurelles : spectroscopie, test caractéristique, réaction suivante, activité optique…), et 5% pour « 3b » (formule brute) (N=375). Nous précisons que certaines tâches cumulent deux ou trois de ces indications.

D'autres données sont moins présentes dans le corpus. Les données sur la composition initiale (2%, classées « 1p ») ou finale (4%, « 3p »). Nous trouvons 5% de tâches avec des données cinétiques à disposition (« c »), et 2% de tâches avec des données thermodynamiques disponibles (« t ») (N=375).

> *« 6.11 Proposer un mécanisme en deux étapes, dont un équilibre rapide, pour la réaction de cyclisation.*
> *6.12 La vitesse de réaction est définie comme la vitesse de formation de l'époxyde C. A partir du mécanisme précédent, établir la loi de vitesse. Cette loi est-elle compatible avec la loi de vitesse expérimentale établie à la question 6.10 ? »*
>
> *Énoncé des Concours Communs Polytechniques – PC-1 (2007)*

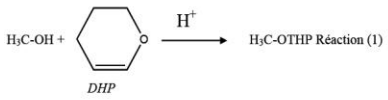
> *« Exercice 3*
> *Dans chacune des réactions suivantes (réalisées en solution dans l'acétone et à chaud), la vitesse est augmentée si on double la concentration de l'ion N_3^-.»*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Paris-Sud (2008)*

Les données thermodynamiques étaient un profil énergétique (plutôt décontextualisé) sur lequel portaient 4 questions dans l'énoncé d'examen de L2 de l'Université Paris-Sud (2008) ainsi que les électronégativités de deux éléments.

> *« I-14 Représenter la formule semi-développée de $CF_3COOSiEt_3$. Écrire le déplacement des électrons dans la liaison Si-O. Proposer un mécanisme pour la réaction de l'énol avec $CF_3COOSiEt_3$, en supposant que le silicium possède une réactivité analogue au carbone. Écrire la formule du composé 5.*
> *[…]*
> *Électronégativité (Echelle de Pauling) : Si 1,8 O 3,5 »*
>
> *Énoncé des Concours Communs Polytechniques – PC-2 (2007)*

Les autres données classées « z » sont présentes dans 2% des tâches en excluant les informations sur les numéros et les rayons atomiques. Nous avons 4 données sur des rendements, une observation d'un phénomène expérimental (dégagement gazeux), ou encore la donnée partielle d'une transformation chimique utile au raisonnement :

« La synthèse de l'intermédiaire B nécessite l'intervention du 6-iodohexan-1-ol. Ce dernier est transformé en M. La préparation du composé M fait intervenir la réaction entre le groupe caractéristique OH d'un alcool et le 3,4-dihydro-2H-pyrane (dont le nom systématique est 3-oxacyclohéxène) noté DHP. On étudie la réaction modèle entre le méthanol et le DHP, qui conduit à la formation d'un produit d'addition du méthanol sur la double liaison du DHP, que l'on note H_3C-OTHP.



»

Énoncé du concours Mines-Ponts – PC (2007)

Quatre énoncés mentionnent des numéros atomiques dans des données séparées des questions, et l'un d'entre eux ajoute deux rayons atomiques ; c'est pour cela que nous les présentons à part, car elles ne font pas partie explicitement d'une tâche de chimie organique. Il s'agit des numéros atomiques d'atomes classiques en chimie organique (H, C, N, O, Cl) dans l'énoncé du BTS 2007, ou de deux numéros atomiques seulement (Os, O) dans l'énoncé des Concours Communs Polytechniques – PC-2 (2007).

Enfin nous n'avons relevé la présence d'aucune donnée quantique dans les tâches étudiées (0%, « q »).

2.3. Synthèse des principaux résultats

Nous trouvons de nombreuses tâches liées à la synthèse organique et aux modèles de la réactivité en chimie organique, conformément aux intentions des concepteurs des programmes d'enseignement.

Nous constatons que les tâches de type III (sens direct de la synthèse) sont prépondérantes par rapport aux tâches de type I (sens indirect ou rétrosynthétique). Nous notons que toutes les tâches de type I à l'exception d'une, sont associées à des données sur les espèces chimiques réactives à mettre en œuvre. Donc il n'y a qu'une tâche purement rétrosynthétique sur le total des tâches (N=375).

Les données utiles à la modélisation sont essentiellement constituées de données sur la structure des espèces chimiques, avec une majorité écrasante de données sur la structure des réactifs (nom, formule plane, éléments sur la constitution, groupe fonctionnel), ce qui est en accord avec la présence d'une majorité de tâches dans le sens synthétique direct. Les données cinétiques et thermodynamiques sont peu présentes, et les données quantiques sont totalement inexistantes.

Remarquons enfin que l'absence de données semble être propre aux évaluations de chimie organique, les énoncés de chimie générale quant à eux sont souvent accompagnés de données utiles aux raisonnements (potentiels standards, pKa, solubilités, coefficients d'écran de Slater, etc.).

3. Analyse a priori des stratégies de réalisation des tâches

Nous inférons les stratégies de réalisation des tâches décrites précédemment selon les deux directions qui nous intéressent : la stratégie basée sur l'utilisation des modèles puis la stratégie de restitution d'éléments théoriques ou empiriques mémorisés. Enfin nous étudions la pertinence de ces deux stratégies par rapport aux tâches proposées dans les énoncés d'examen et à leur coût cognitif pour les étudiants.

3.1. La stratégie de modélisation

3.1.1. Modèles de la réactivité et mécanismes réactionnels

Un mécanisme réactionnel est un modèle du déroulement d'une réaction. Il est élaboré dans une démarche articulant des données empiriques et des modèles de portée plus générale empruntés à différents champs théoriques : thermodynamique, cinétique, théorie classique de la liaison covalente (Lewis), théorie quantique. Loumouamou (1998) montre qu'historiquement les chimistes organiciens ont d'abord eu une approche moléculaire classique (Lewis). Ils ont ensuite dû considérer le milieu réactionnel et les phénomènes socio-moléculaires, dont la thermodynamique constitue le volet macroscopique. Enfin l'application de la théorie quantique à la chimie organique a été fructueuse, malgré un lourd arsenal conceptuel et mathématique nécessitant de faire des approximations (approximation orbitalaire, orbitales frontières, etc.) et de limiter les calculs à un nombre restreint d'espèces chimiques du milieu réactionnel. Ainsi les tâches d'interprétation et de prévision de réactions en chimie organique sont des tâches complexes qui nécessitent la conjugaison de plusieurs approches théoriques.

Nous illustrons cette complexité en synthétisant les informations disponibles sur l'élaboration des mécanismes de certaines réactions de substitution sur les halogénoalcanes (fig. ✦26) et d'hydrohalogénation des alcènes (fig. ✦27). Nous construisons ces tableaux à partir du contenu de livres de chimie organique destinés à des niveaux supérieurs à bac+2 (essentiellement Anslyn & Dougherty (2006), Carey & Sundberg (1996), Carey & Sundberg (1997), Drouin (2005), Smith & March (2007), Vogel (1997)) avec éventuellement l'aide de précisions issues de l'analyse épistémologique de Loumouamou (1998).

Pour les deux mécanismes considérés, nous constatons la complexité et l'imbrication d'éléments théoriques et empiriques de nature diverse. Loumouamou (1998) a d'ailleurs montré que les étudiants étaient gênés par la nécessité de faire appel à différents domaines de la chimie pour résoudre des problèmes de chimie organique.

Les modèles utilisés nécessitent des données complémentaires essentiellement empiriques pour fonctionner correctement : il s'agit de tables d'énergie de liaison, d'enthalpies, d'électronégativité, de pKa, de permittivité, etc. ou de données quantiques (fonctions d'onde avec les coefficients, niveaux énergétiques).

Si les modèles permettent d'interpréter une réaction de chimie organique avec l'aide de données complémentaires, ils se révèlent moins efficaces pour prévoir la stéréosélectivité de ces réactions ou le nombre d'étapes constituant le mécanisme. Par exemple sans l'indication de la molécularité dans la loi de vitesse il est impossible de prévoir le nombre d'étapes dans le mécanisme sur la seule base des modèles, à moins peut-être de mener des calculs quantiques avec des ordinateurs.

FIGURE ✦ 26 **Élaboration du mécanisme d'une substitution sur un halogénoalcane**

Registre théorique / Registre empirique	Thermo-dynamique	Cinétique	Classique (théorie de Lewis, électrostatique)	Quantique
RX +Y^- = RY +X^- avec X = I, Br Y^- = HO^-, HS^-, I^- Solvant : éthers, DMF, DMSO				
Rupture C-X et formation C-Y. Substitution de X par Y sur le C.	Liaison C-X plus faible que C-C ou C-H ***(énergies de liaison)***		La liaison C-X plus polarisable que C-C ou C-H donc plus fragile ***(rayons atomiques, numéros atomiques)***. La liaison C-X est polarisée donc C est un site électrophile qui réagit avec le nucléophile Y^-. ***(électronégativités)***	
Loi de vitesse : $v = k[RX][Y^-]$		Étape cinétiquement déterminante bimoléculaire. Mécanisme concerté : rupture de C-X et formation de C-Y simultanées		
Inversion de la géométrie spatiale autour du carbone fonctionnel (polarimétrie).		L'état de transition $[Y\ldots R\ldots X]^{\neq}$ est moins encombré si l'attaque de Y^- est à l'opposé de X. ***(rayons de Van der Waals)***. Sélectivité cinétique.	Géométrie spatiale par la théorie VSEPR ***(numéros atomiques, rayons atomiques)***. Attaque de Y^- du côté le moins encombré.	Recouvrement orbitalaire plus favorable entre la HO de Y^- et la BV($\sigma^*_{C\text{-}X}$) de RX ***(coefficients des OM, niveaux énergétiques électronégativités,)***
Vitesse importante avec X = I ou Br	Les liaisons C-I et C-Br sont plutôt fragiles ***(énergies de liaison)***. I^- et Br^- sont stables en solution (bases faibles ; ***pKa)***.	Une augmentation de la polarisabilité des réactifs ***(rayons atomiques, numéros atomiques)*** ou une augmentation de l'exothermicité de la réaction (EF plus stable car I^- et Br^- stables) ***(pKa)***, font baisser le niveau de l'ET dans un mécanisme concerté (théorie de Bell-Evans-Polanyi)	Les liaisons C-I et C-Br sont polarisables donc plus fragiles. Stabilité de Br^- et I^- car leur charge est répartie sur un grand volume ***(rayons atomiques, numéros atomiques)***	
Vitesse importante avec Y^- = HO^-, HS^-, I^-…	Analogie limitée avec des bases fortes ***(pKa)***.	Une augmentation de l'exothermicité d'une réaction (EF plus stable si la liaison formée C-Y est forte ***(énergies de liaisons)***) fait baisser le niveau de l'ET dans un mécanisme concerté (théorie de Bell-Evans-Polanyi)	De bons nucléophiles chargés ont leur doublet disponible (polarisabilité, absence de solvatation). Interaction mou-mou avec le C électrophile (théorie de Pearson) ***(numéros atomiques, rayons atomiques, duretés absolues).***	
Vitesse importante avec R peu substitué		ET stabilisé par une faible gêne stérique (***rayons de Van der Waals***). Entropie d'activation négative ***(tables d'incréments de groupes)***, Effet pondéral ***(masses des groupements)***.	Approche de Y^- favorisée par la faible gène stérique (VSEPR, ***rayons de Van der Waals*** des substituants)	
Solvants : éthers, DMF, DMSO	Solvatation du contre-ion libérant Y^- de son influence. ***(enthalpies de solvatation, moment dipolaire et permittivité des solvants, électronégativité)***	Le solvant polaire aprotique stabilise un peu l'ET (charge dispersée) et solvate spécifiquement le contre-ion de Y^- ce qui libère Y^- et fait monter le niveau de l'EI. ***(moment dipolaire et permittivité des solvants, électronégativité)***	Solvants polaires aprotiques. Le solvant polaire dissocie Y^- de son contre ion, et solvate spécifiquement le cation. Un solvant protique solvaterait Y^- par liaison hydrogène. ***(moment dipolaire et permittivité des solvants, électronégativité)***	

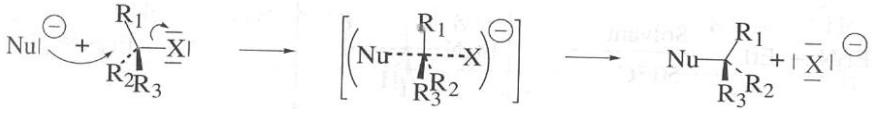


FIGURE ✦26

*Principaux éléments de modèles issus de différents registres théoriques pour interpréter une réaction de substitution sur un halogénoalcane (à partir de livres de chimie organique de niveau supérieur). (**Entre parenthèses, soulignés et en italique)** sont mentionnées les données nécessaires au fonctionnement des éléments de modèles. Pour chaque information d'ordre empirique il ne faut pas limiter son interprétation à la lecture d'un seul élément de modèle (une seule case) quand il y en a plusieurs sur la ligne. Par exemple même sous contrôle cinétique certains modèles (Bell-Evans-Polanyi) s'appuient sur des notions thermodynamiques. La représentation du mécanisme réactionnel est issue de Drouin (2005, p. 349).*

FIGURE ✦ 27 **Élaboration du mécanisme d'une hydrohalogénation d'un alcène**

Registre théorique / Registre empirique	**Thermodynamique**	**Cinétique**	**Classique (théorie de Lewis, électrostatique)**	**Quantique**
Réaction entre HX (HBr, HCl) et un alcène A dissymétrique				
Rupture C=C et formation C-X et C-H. Addition de HX sur C=C.	Liaison π fragile (site réactif). Une liaison C-X est plus énergétique qu'une liaison H-X donc le terme enthalpique est favorable à la réaction ***(énergies de liaison)***		Interaction entre la double liaison nucléophile (riche en électrons) et le H électrophile de HX (liaison polarisée) ***(électronégativités)***	Liaison π fragile car le recouvrement latéral d'orbitales (liaison π) est moins important que le recouvrement axial (liaisons σ). ***(données quantiques)***
Loi de vitesse complexe, avec une contribution importante de la forme : $v = k[A][HX]^n$ n = 2 (ou 3)		Plusieurs mécanismes en compétition. Complexité de la modélisation. Pour le mécanisme le plus contributif l'étape cinétiquement déterminante est polymoléculaire.	Formation d'un adduit entre A et HX, mais interaction mou/dur donc HX pas totalement dissociée. Passage par un ion intermédiaire complexe (ordre élevé par rapport à HX) ***(duretés absolues de Pearson, rayons atomiques, électronégativités)***	
H se fixe majoritairement sur le carbone le plus hydrogéné et X sur le C le plus substitué (orientation Markovnikov)*	Le produit final le plus substitué est le plus stable. Contrôle thermodynamique. ***(enthalpies de formation, entropies, incréments de groupes)***	Si l'ET est tardif on considère la stabilité relative des IR (ion complexe ici). Si l'ET est précoce, on considère l'interaction entre réactifs (postulat de Hammond). Contrôle cinétique. ***(enthalpies de formation enthalpies de réaction)***	H se fixe sur le carbone le moins substitué permettant de former l'IR (ion complexe) le plus stable (le plus substitué) (cas de l'ET tardif). ***(enthalpies de formation des carbocations)***	La HO de A possède un gros coefficient sur le C le moins substitué, H réagit préférentiellement avec celui-ci (cas de l'ET précoce) ***(données quantiques)***
Stéréosélectivité : addition syn ou anti selon la nature de A, du solvant et de la température (polarimétrie)			Formation d'un ion intermédiaire complexe dont la stéréochimie et les ligands (HX, X⁻, solvant) dépendent des conditions expérimentales.	
A l'abri de la lumière, en l'absence de peroxydes		Absence de lumière et d'amorceurs radicalaires, pour éviter la compétition avec une réaction en chaîne plus rapide.	Absence de lumière et d'amorceurs radicalaires, pour éviter la compétition avec un mécanisme réactionnel selon des processus homolytiques.	

** dans certaines conditions de solvant, température et concentrations relatives en A et HX on observe l'orientation anti-Markovnikov (Loumouamou, 1998).*

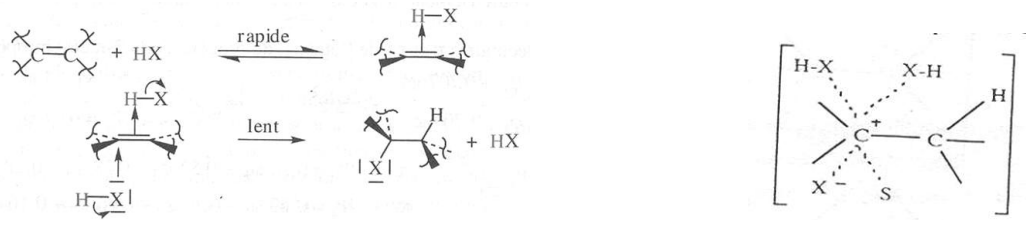


FIGURE ✦27

*Principaux éléments de modèles issus de différents registres théoriques pour interpréter une réaction d'hydrohalogénation d'un alcène (à partir de livres de chimie organique de niveau supérieur). (**Entre parenthèses, soulignés et en italique)** sont mentionnées les données nécessaires au fonctionnement des éléments de modèles. Pour chaque information d'ordre empirique il ne faut pas limiter son interprétation à la lecture d'un seul élément de modèle (une seule case) quand il y en a plusieurs sur la ligne. Par exemple même sous contrôle cinétique certains modèles (Hammond) s'appuient sur des notions thermodynamiques pour corréler l'évolution de l'énergie de l'ET avec celle d'un état stable proche. En bas à gauche est représenté le mécanisme réactionnel d'après Drouin (2005, p. 191) et en bas à droite est représenté l'ion intermédiaire complexe d'après Loumouamou (1998, p.359), S représentant le solvant.*

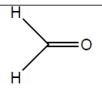
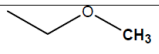
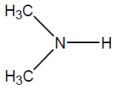
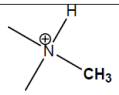
3.1.2. Cette stratégie ne permet pas de réussir dans les conditions fixées

Nous avons constaté lors de l'analyse des tâches présentes dans les énoncés d'examens et de concours que les données utiles à la modélisation concernent essentiellement la structure des espèces chimiques, et très majoritairement celle des réactifs. Nous trouvons quelques indications de numéros atomiques et une seule indication de rayon atomique. Quant aux données cinétiques et thermodynamiques elles sont peu présentes, et les données quantiques sont totalement inexistantes. Or d'après l'analyse de la stratégie de modélisation au regard du savoir de référence, ces données sont nécessaires pour pouvoir faire fonctionner les modèles de la réactivité en chimie organique. La majorité des tâches de types I, II et III proposées ne sont donc pas associées aux conditions nécessaires à leur réalisation selon une stratégie de modélisation.

Prenons un autre exemple : une tâche apparemment simple de type I' issue d'un énoncé intéressant (car nous disposons du corrigé du concepteur du sujet). Le professeur demande aux étudiants de préciser la nature électrophile ou nucléophile de différents réactifs dont il donne la formule (semi-)développée. Dans l'extrait ci-dessous le tableau (que nous avons tronqué pour des raisons de place) contient les réponses du professeur.

« 1-a Parmi les espèces suivantes, précisez celles qui sont des électrophiles (E) et celles qui sont des nucléophiles (Nu).

1-b Écrivez le produit de réaction de chaque nucléophile sur l'iodure de méthyle CH_3-I.

Espèce	Nu ou E	Produit de réaction sur CH_3-I (si Nu)
	E	
CH_3-CH_2-O^- Na^+	Nu	
BH_3	E	
	Nu	

[…]

H^+	E	
Br_2	E	

[…] »

Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Paris-Sud (novembre 2009)

Dans son corrigé le professeur explique à la question 1-a que *«les espèces électrophiles sont celles qui portent une charge (entière ou partielle) positive (ce qui correspond à un défaut d'électrons), il peut aussi y avoir une lacune électronique (un acide de Lewis). Au*

contraire, une espèce nucléophile porte une charge (entière ou partielle) négative, ce qui correspond à un excès d'électrons. Les électrons viennent en général d'orbitales ne participant pas à la liaison σ: doublets n (non-liants) et doublets π (double et triple liaison). Les bases de Lewis sont nucléophiles ». Or les étudiants ne peuvent pas évaluer la présence de charges partielles sans disposer de valeurs d'électronégativités. Ils ne peuvent pas repérer la présence d'une lacune électronique ou d'un doublet non liant, à partir de formules semi-développées (moins complètes que les formules de Lewis) ; il leur faut alors les valeurs des numéros atomiques. Dans ce cas, l'étudiant face à la formule développée du méthanal ne peut que remarquer la liaison double carbone-oxygène ce qui correspondrait à un nucléophile d'après l'un des critères de l'enseignant. Mais finalement le professeur classe le méthanal comme électrophile, sans doute parce qu'il se focalise implicitement sur l'atome de carbone qui porte une charge partielle positive en raison de la différence d'électronégativité entre carbone et oxygène. Il précise d'ailleurs dans son corrigé que *« il faut noter qu'on fait un petit abus de langage en disant qu'une molécule est nucléophile alors qu'on devrait dire que la molécule porte un site nucléophile […]. On peut voir des molécules avec plusieurs sites nucléophiles, électrophiles ou les deux »*. Enfin face aux deux composés trivalents BH_3 et $(CH_3)_2NH$ l'étudiant ne peut pas conclure que BH_3 est l'électrophile (sur le bore) ou que l'amine est nucléophile (sur l'azote) sans la formule de Lewis, les numéros atomiques ou les électronégativités des atomes en jeu.

Enfin nous avons constaté la place importante des tâches dans le sens direct (types II et III) ou s'y ramenant (type I) et dont le but vise notamment la détermination du produit final. Quelques unes d'entre elles ne fournissent pas d'indication sur le produit final (II-1 et II-12 (4%), III-1 et III-12 (8%), N=375). Or toujours d'après notre analyse de la stratégie de modélisation au regard du savoir de référence, de telles tâches se rapprochent de tâches de prévision et sont donc quasiment impossibles à réaliser. Par conséquent, en plus du problème des conditions de réalisation de la tâche, se pose aussi le problème du choix des buts à atteindre assignés aux étudiants.

3.2. La stratégie de mémorisation-restitution

3.2.1. Reconnaître une fonction et restituer une réaction ou un mécanisme générique

Les résultats précédents sont en accord avec ceux de différents auteurs déjà mentionnés dans le chapitre I-1. Pour Barlet & Plouin (1997) l'entrée moléculaire dominante qui néglige les aspects thermodynamiques et cinétiques, déséquilibre l'articulation entre les modèles (nanoscopiques) et les faits empiriques. Ceci favoriserait alors la restitution de réponses

toutes faites et dogmatiques. Les étudiants se focalisent ainsi sur les caractéristiques intrinsèques des réactifs (« réactif intelligent ») sans tenir compte de leur environnement chimique (Loumouamou, 1998). Par conséquent les étudiants n'ont pas de fil conducteur et l'évolution du raisonnement devrait beaucoup au hasard si la mémorisation du jeu de flèches ne leur donnait pas la direction à suivre (Loumouamou, 1998). D'autres auteurs montrent que les étudiants se focalisent sur la structure des espèces chimiques en jeu (et même sur leur mode de représentation) (Ladhams Zieba, 2004 ; Bucat, 2004). Enfin la plupart des étudiants reprennent des séquences d'étapes mémorisées et reconstituent un puzzle (Bhattacharyya & Bodner, 2005 ; Bhattacharyya, 2008).

En se référant à Vergnaud (1990) un canevas de l'activité intellectuelle peut se décomposer en deux temps : reconnaître les éléments pertinents de la tâche et la prise d'information à réaliser, puis mettre en place des procédures. La stratégie de réalisation de tâche qui nous occupe ici est essentiellement fondée dans un premier temps sur la reconnaissance de caractéristiques structurelles clés des espèces chimiques en jeu (fonction, stéréochimie…), puis vient la restitution d'une réactivité spécifique à une famille de molécules (fonction), d'une équation de réaction générique ou d'un mécanisme réactionnel générique (et son jeu de flèches) pour l'appliquer aux espèces chimiques particulières de l'énoncé.

Par exemple un étudiant reconnaît la fonction alcène et le bromure d'hydrogène dans les réactifs. Il a mémorisé qu'en l'absence d'autres indications il serait face à une réaction selon un mécanisme ionique qui vérifie la régiosélectivité (ou « règle » de) Markovnikov ; par contre la mention de la présence de peroxydes évoquerait chez lui le mécanisme radicalaire avec une régiosélectivité anti-Markovnikov. Il proposera alors le dérivé halogéné produit par l'une ou l'autre voie. Il restituera le cas échéant le mécanisme générique d'addition correspondant (ionique ou radicalaire) de HX sur les alcènes et il l'appliquera au cas de l'alcène de l'énoncé et du bromure d'hydrogène HBr (Le Goaller & Loumouamou, 1997b).

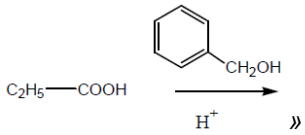
3.2.2. Cette stratégie peut permettre de réussir malgré un coût cognitif assez important

Nous avons constaté lors de l'analyse des tâches présentes dans les énoncés d'examens et de concours que nombre d'entre elles sont orientées dans le sens de la synthèse. En outre la quasi-totalité des tâches donne des informations sur la structure des espèces chimiques réactives (groupe fonctionnel, formule développée, nom). Ainsi sont réunies les conditions de mise en œuvre de la stratégie de mémorisation – restitution décrite précédemment.

Dans l'exemple ci-dessous l'énoncé fournit les formules des deux réactifs en indiquant la présence de peroxydes, ce qui conduirait l'étudiant à redonner le mécanisme d'addition radicalaire de HBr sur l'alcène.

> *« 4- […] Par quel type de mécanisme réagit HBr en présence de peroxyde sur le composé R-CH=CH_2 »*
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Grenoble (juillet 2007)*

Dans cet autre exemple l'énoncé fournit le nom et la formule des réactifs, en indiquant que le milieu est acide et qu'il s'agit d'une estérification. L'étudiant reconnaît alors une réaction d'estérification classique avec une catalyse acide et il lui suffit alors de rappeler le mécanisme correspondant en l'appliquant aux réactifs particuliers de l'énoncé.

> *« L'acide propanoïque est estérifié par l'alcool benzylique en milieu acide. Décrire les différentes étapes du mécanisme de cette estérification.*
>
> 
>
> »
>
> *Énoncé d'examen de L2 de l'Université de Clermont-Fd (2008)*

D'autres tâches visent explicitement une restitution d'éléments théoriques ou empiriques mémorisés :

> *« D2*c. **Rappeler** le mécanisme de la réaction d'acylation du benzène par l'anhydride éthanoïque en présence de chlorure d'aluminium. »*
>
> *Énoncé du concours E3A (2007)*

> *« II-10 **Rappeler** le réactif et les conditions opératoires pour transformer un ester en alcool. »*
>
> *Énoncé des Concours Communs Polytechniques – PC – 2 (2007)*

> *« 39- **Citer** un réactif classique d'époxydation des alcènes. »*
>
> *Énoncé du Concours Mines-Ponts (2007)*

Les indications fournies sur la nature de la réaction ou la structure du produit final sont autant d'indices pour bien choisir la réaction ou le mécanisme générique à redonner.

Si la plupart des tâches de type I, II ou III peuvent être réalisées par une procédure de mémorisation-restitution, leur coût cognitif est important car il faut avoir mémorisé toutes les réactions et les mécanismes génériques, et faire fonctionner cette base de données interne. A titre indicatif nous avons estimé le nombre des réactions et mécanismes présents

dans les programmes qui sont les plus précisément décrits : nous comptons environ 160 réactions et 50 mécanismes réactionnels dans le programme de STS Chimie, 80 réactions et 35 mécanismes ou schéma réactionnels dans le programme de PCSI-PC, et enfin 60 réactions et 20 mécanismes dans le programme de la filière BCPST.

Notons que d'autres tâches que celles de types I, II et III permettent aussi la mise en place d'une stratégie de mémorisation-restitution. Reprenons par exemple l'énoncé d'examen de L2 de l'Université de Paris-Sud (novembre 2009) où l'auteur demande aux étudiants de préciser la nature électrophile ou nucléophile de différents réactifs. Les étudiants peuvent reconnaître la fonction aldéhyde et avoir mémorisé qu'il faut considérer en priorité le carbone fonctionnel et que celui-ci est électrophile (l'étudiant peut avoir aussi éventuellement mémorisé que l'oxygène est plus électronégatif que le carbone ou que dans une forme mésomère l'oxygène récupère souvent le doublet π ce qui crée une lacune sur le carbone). Pour BH_3 l'étudiant mémorise qu'il faut se focaliser sur l'atome de bore car il dispose d'une lacune électronique le rendant électrophile. Dans l'amine $(CH_3)_2NH$ il ne faut pas envisager l'électrophilie potentielle des atomes de carbone (pourtant moins électronégatifs que l'atome d'azote) mais il faut avoir retenu que l'azote trivalent possède un doublet non liant ce qui le rend nucléophile. Enfin il faut avoir retenu que Br_2 agit comme un électrophile (par exemple dans l'addition électrophile sur les alcènes) alors qu'il dispose de 6 doublets non liants. Dans une stratégie de mémorisation-restitution il n'est donc pas nécessaire que l'énoncé fournisse des numéros atomiques, des formules de Lewis ou des électronégativités qui auraient pu permettre une ébauche de raisonnement.

La stratégie de mémorisation peut fonctionner si la mémoire n'est évidemment pas défaillante et si les éléments pertinents reconnus dans la tâche sont suffisamment proches de ceux mémorisés.

3.3. Des stratégies a priori aux procédures effectives

Les deux stratégies décrites précédemment sont deux cas limites. Ainsi l'activité des étudiants les conduira vraisemblablement à faire des va-et-vient entre ces deux stratégies afin d'arriver au but. Les étudiants pourront restituer des éléments mémorisés tout en vérifiant la validité ou la pertinence de quelques aspects de leurs réponses grâce aux modèles de la réactivité. La voie de la modélisation seule ne peut être efficace dans les conditions fixées quel que soit l'effort fourni, alors que celle de la mémorisation-restitution pourra l'être même si l'effort à fournir est important. Nous pouvons donc supposer que les procédures intermédiaires tendent vers la mémorisation-restitution, et que les éléments de

modèles peuvent servir d'appui à la mémorisation pendant le cours, ou de moyens pour tenter de compenser une mémoire défaillante.

Pour le moment nous avons montré que la plupart des tâches dans les énoncés d'examen et de concours privilégient une stratégie de mémorisation-restitution au détriment d'une stratégie de modélisation. Il nous reste à étudier la relation entre ces résultats et la structuration du savoir à enseigner.

4. La structuration globale du savoir à enseigner et sa pertinence

Nous étudions ici la structuration globale des contenus de chimie organique dans les programmes et les livres jusqu'à bac+2 afin d'en étudier la pertinence vis-à-vis des tâches et des stratégies de réalisation étudiées précédemment.

4.1. Omniprésence de la structuration par fonction

Notre analyse de la structuration globale des contenus dans les programmes d'enseignement (fig. ✦28) et les livres de chimie organique jusqu'à bac+2 (fig. ✦29) montre l'omniprésence de la structuration par fonction (alcènes, dérivés halogénés, alcools, etc.).

Cette structuration historique vise à présenter chaque famille d'espèces chimiques à travers la structure de son groupe fonctionnel et ses propriétés. Dans tous les livres utilisant la structuration par fonction, nous constatons que les chapitres suivent globalement l'ordre d'une complexité structurelle croissante : les alcanes et les hydrocarbures, ainsi que les fonctions monovalentes sont placés au début, les dérivés carbonylés et les dérivés d'acides carboxyliques sont placés vers la fin. C'est aussi le cas pour la grande majorité des programmes utilisant la structuration par fonction (9 programmes sur 10).

> *« Résumé du programme :*
> *Structure, réactivité et applications en synthèse des : alcènes, alcynes, dérivés halogénés, composés aromatiques, alcools, amines, dérivés carbonylés et dérivés d'acide. »*
>
> *Extrait du programme de licence de l'Université Paris 7.*

Les livres structurés par mécanismes ou types de réactions sont en fait plutôt proches de la structuration par fonction, car à chaque type de mécanisme est associée une fonction. L'exemple ci-dessous illustre bien l'entrée des chapitres par le type de réactions, et l'association plus ou moins explicite de quelques uns à des fonctions.

« - La réactivité des espèces organiques.
- L'isomérie
- La substitution nucléophile sur carbone saturé
- Les réactions d'élimination
- L'addition électrophile sur carbone insaturé
- L'addition nucléophile sur la fonction carbonyle des aldéhydes et des cétones
- La substitution nucléophile sur la fonction carbonyle des acides carboxyliques et de leurs dérivés
- La substitution électrophile sur le noyau aromatique
- Les réarrangements ou transpositions
- Les réactions radicalaires
- Les oxydations et les réductions »

Sommaire du livre de Depovere (2005)

Nous notons enfin la présence d'un chapitre préliminaire sur la réactivité en chimie organique, les modèles et éléments théoriques pour 7 programmes (N=12) et 16 livres (N=20).

FIGURE ✦ 28 **Structuration du contenu dans les programmes jusqu'à bac+2**

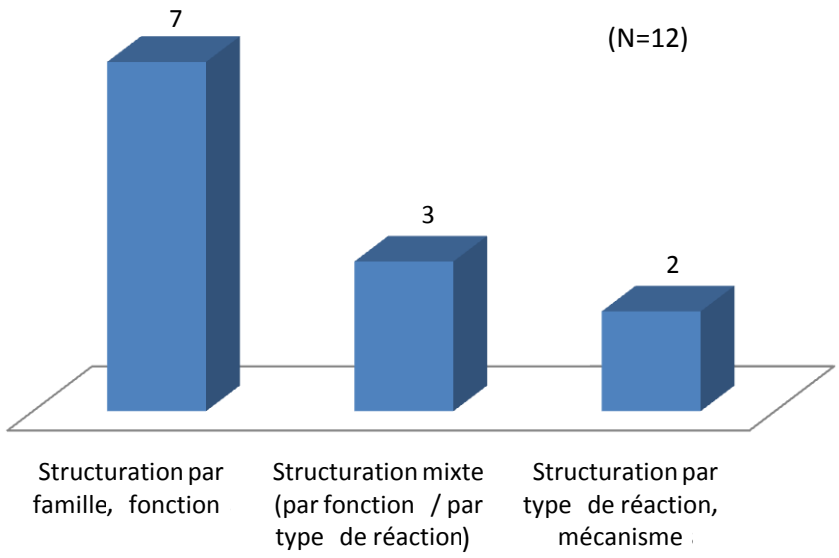


FIGURE ✦28
Le graphique montre la prédominance de la structuration du contenu de chimie organique par fonction ou famille d'espèces chimiques dans les programmes d'enseignement de bac à bac+2. Les programmes classés selon une structuration mixte sont des programmes de licence dans lesquels nous trouvons deux UE de chimie organique où l'une des UE est structurée par fonction et l'autre UE est structurée par type de réaction.

FIGURE ✦ 29 **Structuration du contenu dans les livres jusqu'à bac+2**

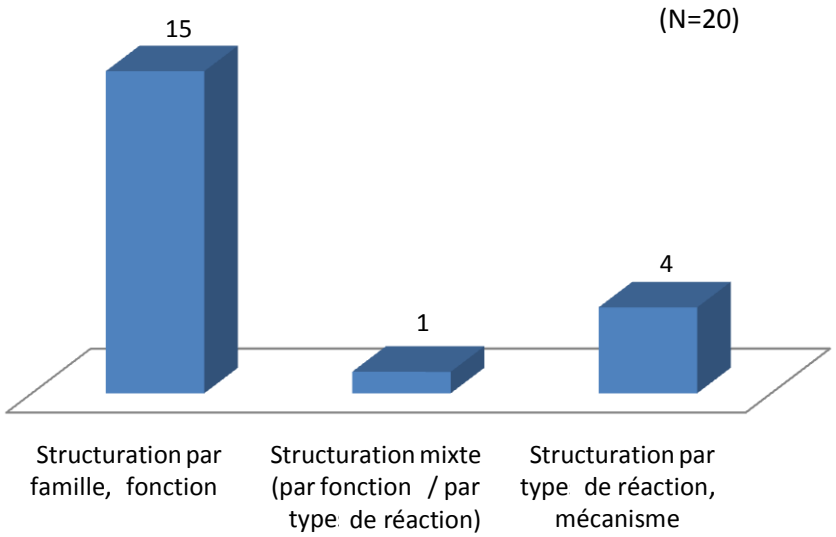


FIGURE ✦29

Le graphique montre la prédominance de la structuration du contenu de chimie organique par fonctions ou familles d'espèces chimiques dans les livres de chimie organique visant les étudiants du bac à bac+2.

En conclusion la structuration par fonction est omniprésente dans le savoir à enseigner (programmes, livres jusqu'à bac+2). Il s'agit maintenant de déterminer si une telle structuration favorise une stratégie de mémorisation-restitution au détriment d'une stratégie de modélisation.

4.2. Pertinence de la structuration par fonction

4.2.1. Une structuration en adéquation avec les stratégies de mémorisation-restitution

La structuration globale des contenus par fonction focalise l'attention des étudiants sur la structure des espèces chimiques réactives. Nous retrouvons ainsi le principal élément que doivent reconnaître les étudiants lors d'une stratégie de restitution. En effet nous avons montré précédemment que les tâches proposées aux étudiants dans les énoncés d'examens et de concours sont réalisables par une stratégie consistant à reconnaître les principales caractéristiques structurelles de l'espèce chimique réactive (son groupe fonctionnel en particulier), puis à restituer une réaction ou un mécanisme générique. Nous supposons que la structuration des savoirs par fonction conduit à une structuration des connaissances des étudiants elle-aussi par fonction. Ainsi face à un problème de chimie organique les étudiants

n'auraient qu'à reconnaître une fonction et aller chercher dans leur mémoire le chapitre concernant cette fonction en particulier.

En conclusion la structuration par fonction, omniprésente dans les programmes et les livres d'enseignement jusqu'à bac+2, est en adéquation avec les tâches soumises aux étudiants et avec la stratégie de mémorisation-restitution. Nous pouvons supposer que la structuration historique par fonction a conduit à la définition de telles tâches, et réciproquement l'utilisation des tâches telles qu'elles sont définies actuellement renforce la nécessité du maintien de la structuration par fonction.

4.2.2. Mais une structuration qui n'est pas progressive par rapport aux modèles

La structuration par fonction est donc construite par rapport à la structure des espèces chimiques réactives et tient peu compte des autres paramètres (thermodynamiques, cinétiques, etc.). Nous avons montré par exemple que l'élaboration d'un mécanisme réactionnel nécessite l'utilisation complémentaire de modèles et de données de natures très différentes (thermodynamique, cinétique, quantique…). C'est le cas par exemple du mécanisme ionique de certaines hydrohalogénations des alcènes. Mais dans le chapitre « alcènes » sont usuellement traités d'autres mécanismes réactionnels parmi lesquels :
- le mécanisme d'hydrogénation d'un alcène qui met en jeu les phénomènes d'adsorption sur un catalyseur solide et la stéréochimie (addition syn) ;
- le mécanisme radicalaire d'hydrohalogénation qui impose de s'intéresser au contrôle cinétique et aux processus homolytiques ;
- le mécanisme de bromation qui implique de comprendre la polarisabilité de la liaison brome-brome et de maîtriser le processus stéréochimique (addition anti).

Les éléments théoriques sont donc diversifiés et nécessaires dès les premiers chapitres, puisque les alcènes constituent l'un des premiers chapitres de la réactivité en chimie organique. Ceci justifie sans doute la présence dans différents livres et programmes d'un chapitre préliminaire regroupant les principaux modèles et éléments théoriques. Nous retrouvons ainsi le reproche fait par Libby (1991) concernant la nécessité d'introduire beaucoup de concepts en même temps avant de pouvoir aborder l'étude des fonctions. La place précoce du chapitre « alcènes » peut aussi conduire à un survol des mécanismes étudiés en négligeant la compréhension des modèles en jeu. Ce survol peut provoquer par exemple la réduction du mécanisme ionique d'hydrohalogénation à une version simpliste et décontextualisée ne se focalisant que sur la stabilité du carbocation intermédiaire (Loumouamou, 1998).

En conclusion la structuration des contenus par fonction ne semble pas permettre un apprentissage progressif de la modélisation car elle implique une introduction simultanée de modèles et de données de natures très différentes (cinétique, thermodynamique, moléculaire, etc.) pour pouvoir traiter la réactivité de chaque fonction.

Chapitre II-3

Propositions pour améliorer cet enseignement-apprentissage

Nous pensons comme Libby (1991) que la structuration du contenu par fonction qui est héritée de l'histoire, est en décalage avec l'approche épistémologique actuelle de la discipline. Nous avons montré dans le précédent chapitre que cette structuration est répandue, elle favorise la stratégie de mémorisation-restitution et ne permet pas aux étudiants de gérer efficacement la complexité de la modélisation en chimie organique.

Une transformation globale de la structuration des contenus nous semble donc indispensable. En effet Green & Rollnick (2006) montrent que la structuration du contenu en chimie organique est un paramètre pouvant expliquer la difficulté de cette discipline. Les résultats non concluants de Loumouamou (1998) lors de sa tentative d'innovation sur un chapitre particulier du cours laissent penser qu'il est difficile de proposer une modification localisée du contenu au sein d'une logique d'ensemble traditionnelle.

Nous avons aussi montré au chapitre précédent qu'il existait un lien entre tâches, stratégies de réalisation et structuration globale du contenu. Par conséquent une redéfinition des tâches soumises aux étudiants (en particulier les tâches d'évaluation) ne pourra être efficace qu'en réalisant conjointement une restructuration du contenu si nous souhaitons voir mises en œuvre des stratégies de modélisation. Ainsi Grove et al. (2008) invoquent entre autres le décalage produit entre leur nouvelle structuration des contenus et l'examen de l'American Chemical Society pour expliquer leurs moins bons résultats à cet examen. Quant à Karty *et al.* (2007) ils obtiennent de meilleurs résultats à cet examen peut-

être aussi parce que leur nouvelle structuration (par type de réaction) est devenue similaire à celle prônée par l'ACS dans leur guide de préparation à l'examen[1].

1. Restructurer globalement le contenu

Des publications et livres de chimie organique jusqu'à bac+2 émerge une structuration alternative par type de réaction. Nous ne pensons pas qu'elle puisse résoudre le problème de la prédominance de la mémorisation sur le raisonnement chez les étudiants. En effet la structuration par type de réaction est proche de celle par fonction puisque certains mécanismes sont étroitement associés à des fonctions. En outre cette structuration favoriserait les stratégies fondées sur la reconnaissance de structures-types dans les espèces chimiques réactives conduisant à tel ou tel type de réaction. Nous pensons que la restructuration de ce contenu doit aller au-delà des outils du chimiste organicien que sont les réactions. Elle doit viser de manière plus globale les questions du chimiste organicien contemporain et une réelle progressivité conceptuelle car la progressivité ne se situe plus dans l'ordre des fonctions ou des réactions à traiter.

1.1. Mettre l'accent sur les questions du chimiste organicien contemporain

La chimie organique est souvent décrite comme « une science, un art et une industrie » (Compain, 2003, p.129), et la synthèse organique en est l'une des composantes essentielles. L'enseignement doit permettre de montrer aux étudiants tous les aspects de la principale finalité des métiers de la chimie organique : la synthèse d'espèces chimiques organiques.

La touche artistique de l'activité du chimiste organicien provient sans doute du fait que tout problème de synthèse organique est complexe et multifactoriel. Et la grande valeur du chimiste organicien vient de sa capacité à appréhender le complexe, gérer la multitude d'informations dont il dispose dans des bases de données, estimer les paramètres directeurs, se montrer créatif dans la gestion des mécanismes sélectifs, afin de proposer des solutions efficaces et valides.

La résolution de problèmes de synthèse organique nécessite à un moment ou à un autre de répondre à diverses questions parmi lesquelles : comment isoler et identifier une espèce chimique organique ? Comment combiner les espèces chimiques disponibles et les réactions

[1] Le guide de préparation à l'examen de l'ACS est réalisé et vendu par l'ACS : http://chemexams.chem.iastate.edu/guides/details_guides.cfm?ID=163 (25/02/2010)

connues afin de fabriquer une molécule organique cible ? Comment choisir la stratégie de synthèse organique la plus efficace ? Ces premières questions conduisent les chimistes à se poser de nouvelles questions plus précises et délicates : pourquoi une réaction ou une séquence de réactions est-elle (in)efficace ? Comment améliorer son efficacité ? Comment rendre une réaction possible, plus rapide ? Comment prévoir la faisabilité d'une réaction, sa vitesse ? Comment prévoir la sélectivité d'un plan de synthèse ? Comment sélectionner une voie réactionnelle plutôt qu'une autre ?

Toutes ces questions conduisent à une diversité de réponses possibles, il faut alors les regrouper autour de quelques pôles et organiser ces derniers de manière progressive pour l'apprentissage.

1.2. Proposer une progressivité dans les réponses et la modélisation

Notre idée a d'abord été de structurer le cursus par modèle (thermodynamique, cinétique, Lewis, etc.), c'est d'ailleurs l'idée que nous avions lors de nos entretiens préliminaires avec les enseignants (présentés à la partie III). Cependant nous nous sommes aperçus que nous risquions de maintenir ainsi un cloisonnement entre les registres théoriques, et les étudiants ne pourraient toujours pas gérer des conflits entre modèles lorsqu'ils seraient face à un problème de chimie organique.

Par conséquent nous proposons de structurer le contenu de telle sorte que les réponses aux premières questions du chimiste organicien ne nécessiteraient que quelques éléments de modèles et ceci de manière intégrée (un élément simple de thermodynamique associé aux premières notions de réactivité dans le modèle classique par exemple). Ces derniers seraient choisis alors avec un domaine de validité plus restreint mais suffisant pour répondre aux premières questions posées. Les questions suivantes nécessiteraient quant à elle l'utilisation d'éléments de modèles plus complexes pour répondre. Ainsi nous mettons en pratique l'idée selon laquelle les modèles sont évolutifs et pertinents pour certains problèmes dans certains contextes (Martinand, 2002).

Nous pensons comme Grove *et al.* (2008) qu'il est pertinent d'envisager une progression en spirale : il est nécessaire de fournir aux étudiants dès la première année une vision d'ensemble de ce qu'est la chimie organique contemporaine, et ils en approfondiraient certains aspects lors des années ultérieures.

2. Favoriser la stratégie de modélisation

2.1. Proposer des tâches (buts/conditions) permettant la modélisation

Nous avons vu au chapitre précédent que les buts et les conditions de réalisation des tâches proposées aux étudiants ne permettent pas la mise en œuvre d'une stratégie de modélisation. Les tâches doivent donc être redéfinies. Il s'agit donc de redéfinir et diversifier les buts (davantage d'interprétation de données et de prévisions accessibles) et de fournir les conditions de leur concrétisation : présence de résultats empiriques à interpréter et des données nécessaires au fonctionnement des modèles.

2.2. Rendre plus opératoires les modèles enseignés

Les problèmes de chimie organique qui partent des réactifs et des conditions initiales et qui visent à déterminer le meilleur chemin réactionnel, génèrent beaucoup de solutions possibles.

Il faut donc savoir faire le tri, c'est ce que montre Scudder (1997) en utilisant des éléments mécanistiques et des heuristiques. D'après lui, les éléments mécanistiques à connaître sont au nombre de douze : il s'agit par exemple des processus de transferts de protons, de l'ionisation avec groupe partant, de l'addition d'un électrophile à une liaison multiple, de la substitution S_N2, de l'élimination E2, ou de processus pericycliques concertés à 6 électrons. L'auteur utilise aussi une douzaine d'heuristiques telles que la règle du ΔpKa qui stipule qu'un groupe partant ou un anion produit par une réaction ne devrait pas être plus de 10 unités de pKa plus basique que le nucléophile ou la base entrant. Il propose aussi des calculs de constante d'équilibre pour les transferts de protons (basés sur les valeurs de pKa), des calculs d'enthalpie de réaction dans le cas des molécules neutres en utilisant les énergies de liaison, des considérations cinétiques comme la grande rapidité des transferts de protons (à des exceptions près), etc. Ainsi il parvient à repérer les chemins réactionnels les plus probables parmi tous ceux qui sont a priori possibles (fig. ✦30).

3. Diversifier les tâches de synthèse organique

3.1. Enseigner la synthèse organique dès les premières années de chimie organique

Si le thème de la synthèse organique apparaît dans les programmes à travers les enjeux et les applications de la chimie organique contemporaine, ou la quantité de réactions chimiques à traiter, les méthodes de la synthèse organique quant à elles (avec en particulier

FIGURE ✦ 30 **Un panel de solutions possibles qu'il faut trier**

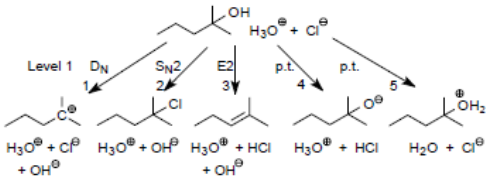


Figure 3. Level 1 of the *tert*-pentyl alcohol to *tert*-pentyl chloride tree. Alternative 1, D_N, ionization of a hydroxide leaving group; alternative 2, S_N2, substitution of hydroxide by chloride; alternative 3, E2, elimination of hydroxide by chloride; alternative 4, p.t., proton transfer from the alcohol to chloride; alternative 5, p.t., proton transfer from hydronium ion to the alcohol.

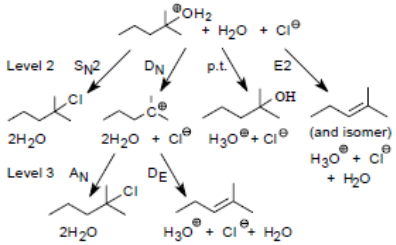


Figure 4. Levels 2 and 3 of the *tert*-pentyl alcohol to *tert*-pentyl chloride tree (trimmed). D_N, ionization of a leaving group followed by A_N, trapping of an electron-deficient species by a nucleophile, completes the S_N1 process. Note that the E1 elimination minor product is also generated: paths D_N, ionization of a leaving group followed by D_E, electrophile loss from a cation to form a pi bond.

FIGURE ✦30

Scudder (1997) illustre ici sa démarche pour faire résoudre par ses étudiants un problème de chimie organique à l'aide d'éléments mécanistiques et d'une douzaine de connaissances de contrôle. Ainsi dans cette réaction entre un alcool et l'acide chlorhydrique concentré (fig. 3), l'auteur envisage différentes possibilités au premier niveau et recherche la meilleure solution. L'étape 1 (ionisation, D_N) est rejetée car le groupe partant devrait avoir un pKa négatif ce qui n'est pas le cas pour OH^-. L'étape 2 (S_N2) est rejetée car le carbone fonctionnel est trop encombré et l'étape ne vérifie pas la règle du ΔpKa. L'étape 3 viole aussi cette règle. Le transfert de proton de l'étape 4 a une constante d'équilibre (obtenue par un calcul avec les pKa) trop faible. Ce n'est pas le cas de l'étape 5 qui a une constante d'équilibre acceptable. L'étape 5 est ainsi validée, avant de passer au niveau suivant (fig. 4). Etc.

l'analyse rétrosynthétique) ne sont réellement abordées que dans les niveaux universitaires supérieurs.

Nous pensons qu'il est important d'enseigner certains aspects de la synthèse organique et de la rétrosynthèse dès les premières années de chimie organique. Cet avis est partagé par Vosburg (2008). D'un côté nous cherchons à ne pas nous limiter à des tâches de restitution de réactions génériques mémorisées, d'un autre côté il ne s'agit pas de plaquer en première année de chimie organique un enseignement de master sur la rétrosynthèse. Il nous faut donc amorcer une démarche difficile mais motivante visant à imaginer et mettre en œuvre des manières innovantes d'aborder la stratégie de synthèse organique à ce niveau d'enseignement. Smith (1990) nous ouvre une piste à l'aide de son algorithme permettant de repérer de manière systématique les liaisons privilégiées dans une analyse rétrosynthétique.

3.2. Circonscrire le nombre de réactions à connaître

Nous avons vu au chapitre précédent que le nombre de réactions génériques à mémoriser peut être très important (160 en STS Chimiste par exemple). Nous pensons que

l'objectif d'un enseignement de la chimie organique n'est pas de mémoriser un panel de réactions génériques. Cependant il peut être utile de connaître les principaux aménagements fonctionnels et structurels utilisables en synthèse organique. Nous pourrions par exemple nous limiter à la trentaine de réactions (créations de liaison carbone-carbone, interconversions de fonctions) citées par Smith (1990). Pour les autres réactions, l'utilisation en cours d'une base de données pourrait être pertinente.

3.3. Utiliser une base de données : la « réactiothèque »

Les chimistes organiciens utilisent des bases de données lors de l'élaboration de synthèses organiques. Nous proposons dès la première année du cours de chimie organique l'utilisation d'une base de données pour la synthèse organique, dont les réactions seraient choisies en accord avec les programmes d'enseignement de la chimie organique jusqu'à bac+2.

Cette « réactiothèque » serait constituée de transformations chimiques (une ou plusieurs réactions) issues de publications en chimie organique, et présentant la transformation sur un exemple précis, avec le rendement obtenu, la référence bibliographique de l'article et éventuellement des remarques. Chaque transformation se verrait attribuer un numéro dans la base de données, celle-ci étant organisée selon plusieurs entrées possibles, en particulier dans le sens synthétique (transformation d'espèces chimiques) ou dans le sens rétrosynthétique (préparation d'espèces chimiques). Comme les transformations d'espèces chimiques appartiennent au registre empirique et qu'aucune indication sur les mécanismes réactionnels ne serait donnée, il est cohérent de structurer la réactiothèque selon une approche descriptive comme celle utilisée historiquement. Ainsi la réactiothèque serait structurée en fonction des propriétés des espèces chimiques donc de leur groupe fonctionnel (transformé ou préparé).

Nous voyons plusieurs intérêts à cet outil. Tout d'abord la réactiothèque ne comporterait que des exemples de transformations chimiques dans des contextes précis, ce qui montrerait aux étudiants un aspect du savoir de référence en chimie organique, à savoir sa genèse par des équipes de chercheurs. En outre l'étudiant qui utiliserait une transformation de la réactiothèque devrait donc consciemment la sortir de son contexte initial, afin de la transposer à d'autres espèces chimiques, d'autres situations expérimentales, d'autres problèmes de chimie organique. Cette décontextualisation ou généralisation ne serait pas anodine pour l'étudiant qui pourrait en comprendre ainsi les limites. Si son utilisation favoriserait sans doute l'apprentissage de certaines réactions de chimie organique, la

réactiothèque n'aurait pas pour vocation d'être mémorisée en vue d'un examen ou d'un concours. La réactiothèque devrait donc de par son existence inciter les enseignants et les auteurs de sujets d'examens ou de concours à proposer aux étudiants d'autres types de tâches autour de la synthèse organique et ne plus se limiter aux tâches de restitution des pièces d'un puzzle.

Toute proposition didactique ne doit pas être imposée aux enseignants de manière descendante en espérant qu'ils soient convaincus par les nouvelles démarches proposées et qu'ils les mettent en place aussitôt dans leurs cours. Si les enseignants font autrement c'est qu'ils ont sans doute de très bonnes raisons de faire ainsi. Il est donc nécessaire de chercher à comprendre quelles sont ces bonnes raisons et ce qui les détermine, afin d'adapter nos propositions didactiques au travail réel de l'enseignant. C'est justement l'objet des parties III et IV de notre recherche.

Partie III

Étude exploratoire de l'activité des enseignants

Chapitre III-1 \ Cadre : analyser l'activité d'un enseignant
Chapitre III-2 \ Résultats : premiers éléments de compréhension de l'activité des enseignants

Chapitre III-1

Cadre : analyser l'activité d'un enseignant

1. Cadre théorique

Nous nous sommes interrogé au chapitre I-1 sur les marges de manœuvre des enseignants afin de faire évoluer en profondeur l'enseignement-apprentissage de la chimie organique. Les enseignants de chimie organique tâcheraient de trouver un équilibre (Scudder, 1997) malgré de fortes contraintes institutionnelles (Loumouamou, 1998) et le manque de livres de chimie organique alternatifs (Johnson, 1990 ; Loumouamou, 1998 ; Scudder, 1997). D'autres auteurs soulignent des habitudes pédagogiques tenaces (Ellis, 1994) et un manque de connaissances pédagogiques pertinentes liées au contenu disciplinaire à enseigner (Bucat, 2004 ; Green & Rollnick, 2006 ; Ladhams Zieba, 2004).

Nous cherchons à obtenir plus de connaissances sur l'activité des enseignants de chimie organique afin de pouvoir envisager ensuite des moyens de l'améliorer. Nous déterminons dans un premier temps comment caractériser et interpréter l'activité d'enseignants de chimie organique.

1.1. Du travail prescrit au travail réel des enseignants

1.1.1. Transformations d'intentions didactiques par les enseignants

Des travaux de didactique des sciences portent sur le faible impact d'innovations dans les pratiques enseignantes. Par exemple les enseignants ne se montrent pas comme des transmetteurs parfaits des nouveaux programmes : il existe un décalage entre les intentions didactiques des concepteurs de programmes et ce qu'en font les enseignants. Différents

facteurs permettent d'interpréter ce décalage : les habitudes professionnelles déjà installées, la maîtrise des contenus scientifiques, les conceptions des enseignants sur la science ou sur l'enseignement et l'apprentissage ou encore des contraintes liées au contexte d'enseignement (Couchouron *et al.*, 1996 ; Hirn-Chaine, 1998 ; Pinto, 2005 ; Viennot *et al.*, 2005).

1.1.2. La redéfinition de la prescription par les enseignants

La prescription est constituée de tout ce que fournit l'Institution à l'enseignant afin de lui imposer une certaine direction, en fixant des buts et des procédures, ainsi que des aides pour concevoir, organiser et réaliser son travail (Goigoux, 2007 ; Mayen & Savoyant, 2002). Il ne s'agit pas seulement des programmes d'enseignement mais aussi d'autres instructions officielles, lois et règlements de la fonction publique d'État, ou encore de l'évaluation par les corps d'Inspecteurs, etc. L'ensemble des prescriptions porté par l'organisation hiérarchique est la prescription primaire. Il existe aussi une prescription secondaire provenant de la formation professionnelle où des formateurs interprètent, reformulent voire concrétisent les prescriptions primaires tout en développant des recommandations autonomes (Goigoux, 2007).

L'Institution fournit donc un ensemble de tâches qu'elle souhaite faire réaliser par l'enseignant : ce sont les tâches prescrites (Leplat, 2004). Face aux tâches prescrites l'enseignant se construit une représentation des buts visés, en fonction des contraintes et des ressources dont il dispose ainsi que des critères de réussite qu'il prend en considération. L'enseignant poursuit alors ses propres buts en même temps que ceux définis par les prescriptions.

Goigoux (2007) revendique une posture épistémologique particulière que nous reprenons à notre compte : il souhaite comprendre la redéfinition de la tâche par l'enseignant ; c'est-à-dire il cherche les bonnes raisons que l'enseignant pourrait avoir d'agir comme il le fait quand il transforme les intentions du prescripteur.

Dans le même esprit Mayen & Savoyant (2002) suggèrent de rétablir la possibilité d'un *« dialogue »* (p.226) entre l'activité des prescripteurs et l'activité des utilisateurs de la prescription.

1.1.3. Le rôle du genre professionnel

La redéfinition de la tâche dépend très largement des ressources disponibles dans le milieu de travail. L'enseignant puise notamment dans le genre professionnel (Clot & Faïta, 2000), ce répertoire des actes partagé par une communauté de professionnels et construit à travers l'histoire de leur métier. Le genre professionnel a donc des dimensions collective, identitaire et historique.

Pour marquer son appartenance à une communauté, l'enseignant doit en partager les préoccupations, les interrogations et la manière d'y répondre (Goigoux, 2007), ainsi il règle son activité personnelle de façon tacite par rapport au genre professionnel. Le genre professionnel agit donc à la fois comme une ressource permettant de s'adapter aux inattendus du réel, et comme une contrainte supplémentaire en marge des prescriptions. Cependant le genre professionnel n'est pas intangible et chaque enseignant l'ajuste, caractérisant ainsi son propre style (Clot & Faïta, 2000).

Nous nous demandons dans quelle mesure les enseignants de chimie organique pourraient constituer une communauté spécifique partageant les mêmes préoccupations et les mêmes pratiques. En effet la structuration du savoir en chimie organique porte une dimension historique (chapitre I-1) et nous avons constaté qu'indépendamment de la nature des formations concernées (STS, CPGE, Université), les énoncés d'examens et de concours, les livres de chimie organique et les programmes d'enseignements montrent beaucoup de ressemblances. Le genre professionnel des enseignants de chimie organique pourrait constituer un moyen d'interpréter leur activité.

Nous présentons ci-dessous un modèle d'analyse qui intègre la notion de genre professionnel.

1.2. Un modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant

Goigoux (2007) propose un modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant que nous décrivons ici.

1.2.1. L'activité du professeur est multifinalisée

L'enseignant oriente son activité vers les élèves (faciliter les apprentissages, faire vivre le collectif-classe) mais aussi vers les autres acteurs de la scène scolaire (rendre lisible et acceptable voire valoriser son activité professionnelle) et vers lui-même (coûts et bénéfices qu'il peut retirer personnellement de son activité). Il peut alors exister des conflits entre ces

finalités, que l'enseignant tâche de réduire afin de trouver un équilibre dans sa situation professionnelle.

1.2.2. L'activité du professeur est multidéterminée

En outre l'activité de l'enseignant dépend essentiellement de trois éléments : le déterminant « Institution » (cadre institutionnel, organisation du travail, prescriptions, etc.), le déterminant « Public » (les savoirs des élèves, leurs rapports au savoir et à l'école, leurs compétences, leur comportement, etc.) et le déterminant « Personnel » (finalités et objectifs de l'enseignant, savoirs et savoir-faire, conceptions, valeurs et croyances, expérience et formation). Le contenu disciplinaire se retrouve dans chacun de ces déterminants, à travers par exemple les programmes d'enseignement (faisant partie des prescriptions), les difficultés et les conceptions des élèves, ou encore pour l'enseignant ses connaissances disciplinaires et ses connaissances professionnelles liées au contenu disciplinaire à enseigner.

1.2.3. Schématisation du modèle d'analyse

Dans son modèle d'analyse de l'activité (fig. ✦31) Goigoux (2007) place la tâche redéfinie au centre du schéma pour rappeler que l'analyse de l'activité passe d'abord par l'analyse de la tâche redéfinie par l'enseignant. L'enseignant appartenant à une communauté dont il partage les préoccupations et les pratiques, le genre professionnel intervient lorsque l'enseignant redéfinit lui-même la tâche. Pour Goigoux (2007) le genre professionnel sert alors de filtre entre le travail prescrit et le travail réel.

Le modèle montre aussi que l'activité de l'enseignant dépend de plusieurs déterminants (Institution, Personnel et Public) et qu'elle est dirigée simultanément vers les autres acteurs de la scène scolaire, vers les élèves et la classe, et vers l'enseignant lui-même. Ce modèle est cyclique dans la mesure où les effets produits par le travail jouent le rôle de nouveaux déterminants pour des cycles futurs de l'activité.

L'analyse implique donc de repérer les dimensions potentiellement antagonistes de l'activité et les compromis faits par l'enseignant. Par conséquent *« l'activité n'est plus limitée à ce qui se fait. Ce qui ne s'est pas fait, ce qu'on voudrait faire, ce qu'il faudrait faire, ce qu'on aurait pu faire, ce qui est à refaire [font partie de l'activité :] le réalisé n'a plus le monopole du réel »* (Clot & Faïta, 2000, p.35).

FIGURE ✦ 31 **Modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant**

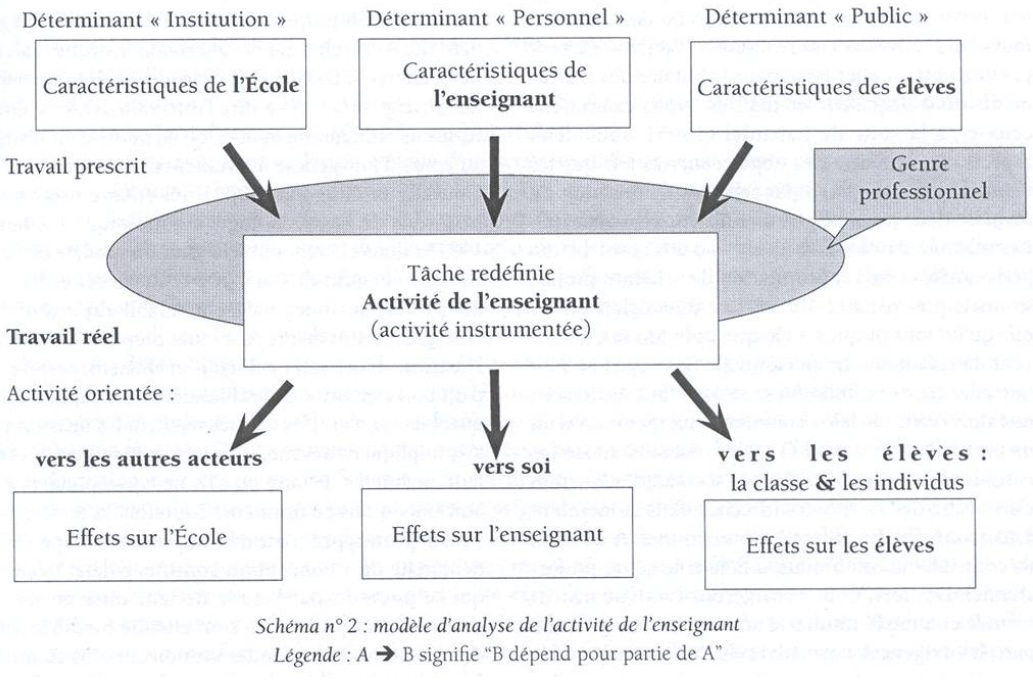


FIGURE ✦31

Le modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant de Goigoux (2007, p.59) montre que l'activité de l'enseignant est multifinalisée (ou multi-orientée) et multidéterminée. L'analyse de la tâche redéfinie est au cœur de ce modèle. Le genre professionnel agit comme un filtre entre le travail prescrit et le travail réel de l'enseignant.

Nous trouvons l'approche ergonomique de Goigoux (2007) particulièrement intéressante, en considérant l'enseignant comme un professionnel dans un environnement complexe qui oriente son activité de différentes manières parfois contradictoires.

Nous décidons d'enrichir le cadre précédent grâce aux possibilités supplémentaires d'interprétation qu'offre le cadre théorique des PCK.

1.3. Les PCK

1.3.1. Des connaissances professionnelles liées au contenu à enseigner

Le concept de PCK (Pedagogical Content Knowledge) est dû à Shulman (1987) qui a cherché à caractériser les différents domaines de connaissances nécessaires aux enseignants pour exercer leur activité professionnelle. Nous traduisons le terme PCK par connaissance pédagogique liée au contenu (Méheut, 2006). En effet les PCK comblent un vide entre les connaissances purement disciplinaires et celles de pédagogie générale, en intégrant notamment ces deux champs afin d'en constituer un nouveau, focalisé sur l'enseignement et l'apprentissage d'un contenu disciplinaire spécifique (Autain Kermen, 2007; Bécu-Robinault,

2007 ; Bucat, 2004 ; De Jong, 2003 ; Gess-Newsome & Lederman, 1999 ; Morge, 2003 ; Van Driel *et al.*, 1998).

Nous considérons les PCK comme caractéristiques de l'enseignant donc elles appartiennent au déterminant « Personnel » dans le modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant de Goigoux (2007) décrit précédemment. Certaines PCK pourraient être partagées par la communauté des enseignants de chimie organique comme des composantes du genre professionnel.

1.3.2. La diversité des PCK

Les travaux autour des PCK montrent la diversité des éléments nécessaires à l'enseignement d'un sujet précis : expérience, connaissances et compétences personnelles de l'enseignant dans ce domaine, connaissance des difficultés des élèves, connaissance des buts de l'enseignement de sciences et des programmes, connaissance des méthodes pédagogiques et d'évaluation (Méheut, 2006).

Les connaissances purement disciplinaires représentent donc une composante nécessaire mais pas suffisante : certains enseignants possédant un haut niveau de connaissances disciplinaires peuvent se montrer incapables de les faire acquérir à leurs élèves (Magnusson *et al.*, 1999). De Jong (2003) montre aussi les difficultés des enseignants à mettre en accord leurs pratiques d'enseignement et leurs idées sur les modèles et la modélisation : les modèles sont considérés comme des constructions par les enseignants mais ils sont enseignés comme des objets ou des faits.

1.3.3. Le développement de PCK

Le développement des PCK s'effectue par un processus ancré dans la pratique. C'est pourquoi les enseignants débutants ou qui doivent enseigner un thème donné pour la première fois, n'ont pas encore développé de PCK (De Jong, 2003 ; Van Driel *et al.*, 1998 ; Bécu-Robinault, 2007).

Deux approches complémentaires peuvent permettre de développer des PCK. La première consiste à donner des exemples de PCK c'est-à-dire des connaissances d'enseignants expérimentés qui leur permettent de faire construire chez leurs élèves une connaissance précise sur un sujet donné (Bucat, 2004 ; De Jong, 1998 ; Morge 2003). La deuxième approche consiste à mettre en place les conditions dans lesquelles puissent se développer les PCK. Ainsi diverses activités peuvent être envisagées avec les enseignants en

prenant appui par exemple sur des livres scolaires, des réponses authentiques d'élèves, des propositions d'enseignement, des expériences personnelles, etc. (Autain Kermen, 2007 ; De Jong, 1998 ; Van Driel *et al.*, 1998).

Nous observons un recouvrement entre la nature du genre professionnel et les moyens de développer des PCK : les échanges d'expériences entre les membres de la même communauté enseignante influent sur leur activité.

Nous trouvons complémentaires l'approche ergonomique et l'approche par les PCK : la première considère l'enseignant par rapport à la complexité de son environnement professionnel (déterminants divers, genre professionnel), la deuxième précise les caractéristiques de certaines connaissances-clés de l'enseignant lui-même, éventuellement partagées avec les autres enseignants de la communauté à laquelle il appartient. C'est pourquoi nous les utilisons pour tenter d'interpréter l'activité d'enseignants de chimie organique.

2. Comment interpréter l'activité des enseignants ? Question et hypothèse de recherche

Les résultats de la partie II nous ont conduit à faire des propositions quant à la structuration globale des contenus, l'enseignement de la synthèse organique dès les premières années, ou encore l'enseignement des modèles de la réactivité et des mécanismes réactionnels. Nous cherchons maintenant à comprendre l'activité des enseignants de chimie organique par rapport à ces trois thèmes afin de déterminer des moyens de la faire évoluer.

Q	Comment interpréter l'activité des enseignants de chimie organique en relation avec la structuration globale des contenus, l'enseignement de la synthèse organique et l'enseignement des modèles et des mécanismes réactionnels ?

Dans le cadre du modèle d'analyse de l'activité de l'enseignant (Goigoux, 2007) que nous utilisons, nous cherchons à comprendre à la fois les déterminants de l'activité des enseignants de chimie organique, l'influence potentielle du genre professionnel et les compromis qu'ils font face aux tensions au sein de leur activité. Nous cherchons plus

précisément à déterminer la nature des PCK mises en œuvre ou de celles qui leur manquent pour pouvoir diversifier leurs pratiques.

H Nous faisons l'hypothèse que l'activité des enseignants de chimie organique est fortement déterminée par l'institution, leurs étudiants, leurs caractéristiques propres (conceptions, PCK) ainsi que leur genre professionnel.

3. Méthodologie

Nous cherchons à apporter des éléments de réponse à la question précédente. Pour cela nous constituons un matériau d'analyse que nous décrivons ci-dessous et que nous analysons selon différentes lignes directrices.

3.1. Le corpus : des pratiques déclarées

3.1.1. Réalisation d'entretiens et de leur transcription

Nous avons mené des entretiens individuels auprès de neufs enseignants ayant l'expérience de l'enseignement de la chimie organique jusqu'à bac +3 : 4 en STS Chimie, 2 en CPGE (PCSI et BCPST), 3 enseignants-chercheurs à l'Université (fig. ✦32). Ces entretiens semi-directifs, d'environ une heure chacun, ont été enregistrés puis transcrits intégralement afin d'être analysés. Précisons ici que lors de la transcription les hésitations ou répétitions qui alourdissent la compréhension sont gommées, certaines formes sont corrigées lors du passage de l'oral à l'écrit ; par exemple « c'est pas » devient « ce n'est pas ». Chaque locuteur est identifié au moyen d'une lettre suivie d'un numéro correspondant à l'ordre des prises de parole. Nous affectons à chaque enseignant l'initiale de son pseudonyme (B pour Bertrand, etc.) et nous nous réservons la lettre A.

Nous avons choisi des enseignants issus de différentes formations (CPGE, STS, Université) afin de déterminer si des points communs existent entre eux. Ceux-ci pourraient alors constituer des arguments à l'existence d'un genre professionnel des enseignants de chimie organique.

FIGURE ✦ 32 **Les enseignants qui ont participé aux entretiens**

Pseudonyme	Date de l'entretien	Enseignement au moment de l'entretien	Ancienneté dans l'enseignement supérieur de la chimie au moment de l'entretien
Bertrand	10/11/2006	STS Chimiste	8 ans
Cathy	18/11/2006	CPGE (BCPST 1ère année)	5 ans
Danielle	11/12/2006	Université	14 ans
Émilie	05/02/2007	STS Chimiste	8 ans
Franck	05/02/2007	Récemment CPGE (PCSI) puis STL & STS Chimiste	3 ans
Gaëlle	12/02/2007	STS Chimiste	8 ans
Hélène	24/02/2007	STS Chimiste	10 ans
Isabelle	27/02/2007	Université	14 ans
Jacques	29/03/2007	Université	30 ans

FIGURE ✦32
Le tableau donne un profil succinct des enseignants ayant participé aux entretiens.

Nous sommes conscients des limites de ce recueil de données. Il ne s'agit que de pratiques déclarées par l'enseignant, par conséquent ce recueil nous permet une analyse de leur activité à travers le filtre de l'enseignant qui s'exprime dans l'entretien. Cela nous renseigne davantage sur leurs caractéristiques propres (déterminant personnel : conceptions, PCK, etc.) et le genre professionnel, que sur les autres déterminants (institution, public). Nos connaissances objectives issues des parties I et II (programmes, énoncés d'examens et de concours, difficulté des étudiants, etc.) seront utilisées pour mieux comprendre certaines déclarations des enseignants. Par ailleurs ce recueil a été constitué au début de notre recherche dans une phase exploratoire visant à enrichir notre réflexion ; c'est pourquoi nous avions opté pour une méthodologie d'un bon rapport bénéfice / coût par rapport à notre grain d'analyse. Il faut donc être prudent dans les interprétations, et celles-ci seront complétées et affinées grâce aux données recueillies lors de l'analyse de l'activité instrumentée des enseignants (partie IV).

3.1.2. Le guide d'entretien

Nous avons construit le guide d'entretien (annexe, CD-ROM) selon plusieurs principes.

L'entrée est volontairement ouverte afin d'obtenir un avis sans ambiguïté de l'enseignant sur la discipline et son enseignement, ainsi que sa connaissance de certaines difficultés de ses étudiants. Nous tâchons ensuite d'organiser la parole de l'enseignant autour de plusieurs thèmes : son enseignement des mécanismes réactionnels, son enseignement de la stratégie

de synthèse organique, la structuration de son enseignement sur l'année, et les outils et ressources qu'il utilise.

Nous complétons ce recueil en soumettant à chaque enseignant deux documents résumant quelques éléments de pratiques d'autres enseignants. Ces éléments sont issus de préparations de cours que nous avons récupérées, de programmes d'enseignement, de publications ou de livres de chimie organique. La confrontation à d'autres pratiques permet à l'enseignant de parler de sa propre activité en commentant celle des autres (Courally, 2007) et nous permet de déterminer si d'autres pratiques lui semblent envisageables.

Le premier document comporte la description de quatre démarches d'introduction du mécanisme d'hydrohalogénation des alcènes. Nous les avons choisies car l'articulation entre les données expérimentales et la construction théorique est variable : les deux cas extrêmes correspondent à un mécanisme formel et décontextualisé confirmé après-coup par un exemple de réaction et un mécanisme construit à partir de données expérimentales précises. Notons que ce document n'est utilisé que pour les 6 derniers entretiens ; il s'agit d'un réajustement méthodologique afin de mieux comprendre l'activité des enseignants.

Le deuxième document comporte quant à lui la description de quatre structurations des contenus ; nous avons choisi des structurations différentes par famille de molécules, liaison ou mécanisme réactionnel. Certains montrent explicitement la place des modèles et des éléments théoriques (dans un chapitre au début, vers la fin, ou en filigrane). Enfin l'un d'eux fait explicitement allusion à la stratégie de synthèse organique (création de liaisons carbone-carbone).

En fin d'entretien nous soumettons à chaque enseignant deux ébauches de nos propositions (« réactiothèque », structuration par modélisation croissante), cela dans le double objectif de confronter l'enseignant à d'autres pratiques possibles (comme précédemment) ainsi que de tester la pertinence de nos deux propositions avant la phase de conception de l'instrument didactique (partie IV).

Les conditions d'entretien pour chaque enseignant sont synthétisées dans le tableau suivant (fig. ✦33).

3.2. Lignes d'analyse du corpus

Lors de notre analyse des entretiens nous focalisons notre attention sur les trois thèmes suivants : structuration globale des contenus, enseignement de la synthèse organique, enseignement des modèles et des mécanismes réactionnels. Pour chaque thème nous recherchons des indices permettant d'interpréter l'activité des enseignants de chimie organique par rapport à l'institution, leurs étudiants, leurs caractéristiques propres (conceptions, PCK, etc.) ainsi que leur genre professionnel. Ceci nous amènera à évaluer certaines possibilités d'évolution de leur activité.

FIGURE ✦ 33 **Chronologie des thèmes pour chaque entretien**

Enseignants / Thèmes	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Bilan initial, généralités	1	1 3	1	1 4	1	1	1	1	1
Mécanismes réactionnels	3 5 (pas de doc.)	5 (pas de doc.)	3 5 (pas de doc.)	2 (doc.)	2 (doc.)	2 (doc.)	2 (doc.)	2 (doc.)	2 (doc.)
Synthèse organique	6	6	6	5	3	3	3	3	3
Progression	4 7 (doc.)	2 7 (doc.)	4 7 (doc.)	6 (doc.)	4 (doc.)	4 (doc.)	4 (doc.)	4 (doc.)	4 (doc.)
Propositions	8	8	8	7	5	6	5	5	5
Ressources, outils	2	4	2	3	6	5	6	6	6

FIGURE ✦33

Le tableau indique pour chaque enseignant l'ordre des thèmes abordés. En ce qui concerne les mécanismes réactionnels nous indiquons la présence ou l'absence du document qui a servi de base de discussion sur d'autres pratiques enseignantes.

Chapitre III-2

Résultats : premiers éléments de compréhension de l'activité des enseignants

Nous présentons dans ce chapitre nos principaux résultats et leur interprétation concernant l'activité de 9 enseignants de chimie organique, autour des thèmes suivants : structuration globale des contenus, enseignement de la synthèse organique, enseignement des mécanismes réactionnels et des modèles.

1. La structuration globale des contenus

1.1. Une structuration des contenus répandue : les principaux outils théoriques puis les grandes familles

> *A- « D'accord. Quelle est ta progression sur l'année ? Quels sont tes chapitres ? »*
> *G- « Alors au début : structure spatiale des molécules, donc représentations planes, dans l'espace, conformation, configuration, stéréochimie, énantiomérie, diastéréoisomérie. Ensuite les effets électroniques, inductifs, mésomères. Les notions de mécanismes réactionnels de manière générale pour introduire les diagrammes d'énergie potentielle. J'ai mis les solvants à ce niveau-là parce que c'est dans le programme et que j'en avais besoin avant de faire les dérivés halogénés, c'est mal placé, mais c'est surtout dans les dérivés halogénés qu'on en a besoin, bref. Les alcanes, les alcènes, les alcynes. J'oubliais les alcènes, les diènes, les alcynes, les aromatiques, et après en fonction du temps qui reste ce sera RX ou organomagnésien. »*
>
> *Gaëlle, STS (annexe, G47)*

Nous observons que les contenus sont structurés principalement en deux parties. Une première partie traite de la structure des molécules organiques (n=9) puis présente les principaux outils théoriques (espèces chimiques réactives, nucléophilie, intermédiaires réactionnels, diagrammes énergétiques…) nécessaires à l'étude de la réactivité chimique

(n=7). Dans une seconde partie les 9 enseignants organisent les contenus autour des grandes familles de molécules organiques (alcanes, alcènes, aromatiques, alcools, etc.), la chronologie des familles étant modérément variable d'un enseignant à l'autre.

> *« On commence par les fonctions simples, donc avec les mécanismes sur les composés halogénés, après suivent les fonctions alcools, aldéhydes, acides, les alcènes, et les aromatiques. On traite tout ça de manière générale et assez rapide, en 20 heures de cours et 10 heures de TD, et ensuite les années suivantes on revient sur les réactions plus particulières notamment formation des liaisons CC, les aromatiques… »*
>
> *Isabelle, Université (annexe, I62)*

> *« Mais cela dépend, des fois je fais alcools aldéhydes électrophiles ensemble ou alors je sépare. En tout cas je fais deux chapitres séparés aldéhydes électrophiles et aldéhydes nucléophiles, et en tout cas aldéhydes nucléophiles je le fais avec les alcènes. »*
>
> *Cathy, CPGE (annexe, C10)*

La structuration observée (structure moléculaire, outils théoriques de la réactivité puis fonctions) semble partagée par les enseignants quel que soit leur lieu d'enseignement (STS, CPGE, Université), ce qui est concordant avec notre analyse des livres d'enseignement (chapitre II-2). Ceci nous laisse supposer l'existence et l'importance d'un genre professionnel des enseignants de chimie organique d'autant plus que nous observons des résultats similaires pour des enseignants bénéficiant d'une relative liberté pédagogique (programme sur deux ans en STS Chimiste, enseignants participant à l'élaboration du programme à l'Université). La chronologie choisie pour les familles serait par contre propre à l'enseignant, c'est-à-dire une manifestation de son style. Le déterminant institutionnel a aussi son importance.

1.2. Des contraintes « institutionnelles » favoriseraient cette structuration

La structuration des contenus dans le programme semble inciter 6 enseignants à utiliser celle observée précédemment.

> *A- « Hmm. Passons à la progression ? Quelle est ta progression sur l'année ? Comment sont construits tes chapitres ? »*
> *E- « J'ai pris et j'ai gardé, peut-être à tort, le référentiel. »*
>
> *Émilie, STS (annexe, E98)*

L'articulation des notions de chimie générale avec les outils théoriques de chimie organique est une contrainte (n=3), en particulier quand ces enseignements sont assurés par des professeurs différents ou dans plusieurs modules (Jacques).

> *« Par exemple entre la stéréochimie et les halogénoalcanes, je mets la cinétique et puis généralement je crois que c'est avant les alcools, je fais les acides bases. Pourquoi ? Parce que les alcools on va parler du phénol avec son pKa, et je pense qu'il faut redéfinir le pKa même s'ils l'ont vu au lycée, non ils l'ont pas vu, si ils le voient maintenant, je ne sais plus. »*
>
> *Cathy, CPGE (annexe, C93)*

Le temps alloué à cet enseignement est aussi un critère de choix d'une structuration pour 5 enseignants.

> *A- « Dans les progressions ici - vous pratiquez la A - est-ce qu'il y en a une que vous pourriez envisager de faire, ou sinon une que vous ne pourriez absolument pas faire ? Est-ce qu'il y a des choses qui vous choquent et vous empêcheraient de les faire complètement ? »*
> *B- « Tout dépend du nombre d'heures qu'on a pour [les] faire. »*
>
> *Bertrand, STS (annexe, B124)*

L'activité des enseignants en rapport avec la structuration globale des contenus est donc en partie déterminée par l'institution (programmes, organisation de l'enseignement par rapport à celui de chimie générale, le temps alloué à la chimie organique).

Nous trouvons intéressante une dernière observation concernant Cathy et Franck. En ce qui concerne les principaux outils théoriques de la chimie organique, les deux programmes de CPGE ne prévoient pas une présentation préliminaire à l'étude des fonctions. Franck suit le programme sur ce point lors de son année d'enseignement en PCSI. Cathy (BCSPT) décide de transférer des notions qu'elle devait traiter en chimie générale vers un tel chapitre préliminaire de chimie organique présentant la réactivité. Cathy redéfinit la prescription alors que Franck suit simplement le programme. Il est remarquable de noter que lorsque Franck enseignait en PCSI il s'agissait pour lui de sa première année d'enseignement alors que Cathy enseigne depuis quelques années en BCPST. Nous nous demandons alors dans quelle mesure Cathy aurait pu construire avec l'expérience des PCK sur l'enseignement des modèles de la réactivité (dans un chapitre préliminaire à l'étude des fonctions). Quant à

Franck, novice, il ne disposerait pas encore de PCK sur ce point donc il utiliserait une autre connaissance dont il dispose, celle du programme (Bécu-Robinault, 2007).

1.3. Cette structuration aurait des avantages pour les étudiants

Pour 3 enseignants la structuration utilisée a l'avantage d'être claire et organisée.

> *« Et donc, ils ont toute une partie de présentation, qui est appelée dans la progression A "chimie organique générale", où ils ont toute une série d'informations dans laquelle ils vont pouvoir aller piocher et ils sauront que ça se trouve là. »*
>
> *Emilie, STS (annexe, E115)*

> *A- « Est-ce qu'il y a d'autres avantages pour les étudiants dans cette progression ? »*
> *G- « C'est peut-être plus clair pour eux. »*
> *A- « C'est-à-dire ? »*
> *G- « Plus structuré. »*
>
> *Gaëlle, STS (annexe, G51-52)*

Elle offrirait en outre l'intérêt d'être progressive : d'une part par rapport aux outils théoriques, dont les principaux sont présentés au début avant d'être affinés et complétés lors de l'étude des fonctions (Bertrand), d'autre part par rapport aux fonctions qui peuvent être classées par complexité de structure moléculaire croissante (n=2) ou rapprochées en fonction de leur type de réactivité (addition, substitution...) (n=3).

> *« C'est celle qui correspond, parce que je l'ai pratiquée plusieurs fois, c'est celle qui…. Cette progression me gêne beaucoup quand j'enseigne la chimie à des bac + 3, je ne travaille pas avec ce type de progression. Mais pour une initiation à la chimie on n'a pas le choix, alors on n'a pas le choix parce qu'en travaillant, en posant les bases structurales et de réactivité dans un premier temps, et ensuite en travaillant par complexité croissante : alcanes, alcènes, aromatiques, etc.… les dérivés halogénés aussi, on les met juste après les alcanes, donc on fait alcanes, dérivés halogénés, alcènes… donc ça permet d'aller avec une difficulté progressive… En fait on fignole, à chaque fonction on fignole.*
>
> *[…]*
> *Dans un premier temps on ne parle pas du solvant, après on commence à parler de l'influence des solvants quand on est dans la SN1 SN2 E1 E2 […]. Après quand on raisonne sur les aromatiques, on parle de SE aromatique, on parle de l'activation électrophile. On complète, et à chaque fois on va de plus en plus loin, à chaque fois en fait on rajoute des choses. »*
>
> *Bertrand, STS (annexe, B86,88)*

L'extrait ci-dessus montre aussi que Bertrand considère que la seule structuration efficace pour un étudiant débutant serait celle par fonction.

Le cas de Bertrand est intéressant : il dit avoir pratiqué plusieurs fois la structuration par fonction et qu'elle est la seule possible pour une initiation. Nous pensons que via la pratique de cette structuration Bertrand a *« développé une structure conceptuelle dans laquelle les connaissances sur la discipline, l'enseignement, l'apprentissage et les élèves sont agencées de manière cohérente »* (Bécu-Robinault, 2007, p. 166) et cette cohérence l'a convaincu de la pertinence d'une telle structuration à ce niveau. Nous ne revenons pas ici sur les inconvénients de la structuration par fonction (parties I et II), mais il semble que les enseignants en voient aussi quelques uns.

1.4. Cette structuration aurait aussi des inconvénients pour les étudiants

Danielle et Isabelle indiquent qu'un tel cloisonnement empêche les étudiants de repérer les similitudes et les différences entre certains groupes fonctionnels ou d'aborder les molécules polyfonctionnelles. Pour Gaëlle et Hélène, la première partie (dite de « chimie organique générale ») est longue pour les étudiants qui doivent attendre plusieurs mois avant d'étudier enfin les réactions lors de l'étude des fonctions.

> *« Ce n'est pas forcément très satisfaisant parce que du coup on arrive en décembre et on n'a pas encore commencé à écrire des réactions chimiques, donc ça les frustre un peu les élèves. »*
>
> *Gaëlle, STS (annexe, G48)*

Il semble donc que la structuration par fonction souffre de quelques inconvénients. Cependant nous notons que les inconvénients mentionnés ne concernent pas la progressivité de l'apprentissage des concepts théoriques (partie II).

1.5. Les propositions d'autres structurations semblent trop difficiles à mettre en œuvre

Lorsque nous soumettons aux enseignants quatre structurations des contenus différentes, plusieurs d'entre eux montrent des affinités pour les autres structurations (que celle par fonction) et pour certains éléments qui les constituent : structurations mettant en avant la formation de liaisons (n=4) ou s'articulant autour d'éléments théoriques (n=5).

> *F- « Moi le truc qui me plait, c'est création d'une liaison CC, ça c'est clair. »*
> *A- « Pourquoi ? »*
> *F- « Parce que c'est justement le caractère de la synthèse, c'est-à-dire, j'essaie de faire comprendre la différence dans les réactions du point de vue synthétique, c'est-à-dire insister*

> *sur le fait qu'il y a création de la liaison CC, c'est-à-dire que si je pouvais faire "un programme", j'essaierais de mettre à part ces réactions là. »*
>
> *Franck, CPGE (annexe, F87-88)*

Nous remarquons que quatre enseignants n'apprécient pas l'idée de devoir traiter la famille des organomagnésiens dès les premières fonctions (structuration B tirée du programme de PCSI). C'était le cas initialement de Cathy, mais celle-ci s'est finalement rendu compte, lors d'interrogations orales (colles) qu'elle assure pour sa collègue de PCSI, que les étudiants s'en sortaient plutôt bien.

> *A- « Dans la progression B. »*
> *J- « Oui, je n'aurais pas fait comme ça. Parce que déjà on parle des organomagnésiens, avant d'avoir parlé des composés halogénés, avant d'avoir défini disons justement la réactivité des espèces, donc leur caractère nucléophile ou électrophile. Donc pour parler spécialement des organomagnésiens là, je ne le verrais pas comme ça. »*
>
> *Jacques, Université (annexe, J74)*

Nous n'avons observé aucun enseignant montrant une forte envie d'abandonner la structuration qu'il utilise au profit d'une de celles qui lui ont été présentées.

> *« J'ai toujours un peu de mal à sortir des familles… »*
>
> *Émilie, STS (annexe, E141)*

Enfin, parmi quatre enseignants qui voient un intérêt à notre proposition de structuration du cours de chimie organique par modélisation croissante, deux enseignants réclament le détail de sa mise en œuvre pour pouvoir éventuellement l'envisager.

Il semble que les enseignants ne soient pas prêts à envisager le saut vers l'une des autres structurations proposées, même si des éléments précis de celles-ci les intéressent. Nous pensons que les autres structurations possibles sont globalement difficiles pour les enseignants eux-mêmes car elles iraient à l'encontre de la cohérence portée par la structure conceptuelle que les enseignants se sont construite en pratiquant la structuration par fonction. En outre ils n'ont pas eu l'occasion de pratiquer personnellement de telles structurations. Ainsi Cathy était effrayée par la place des organomagnésiens dans la progression de PCSI, mais elle a changé d'avis grâce son expérience d'évaluation d'étudiants de PCSI. Enfin des enseignants réclament des précisions sur notre proposition de progression : Courally (2007) montre qu'au lieu de contraindre fortement les enseignants une proposition précisément décrite leur permet de mieux la comprendre et augmente leur marge de manœuvre lors de l'intégration de la proposition dans leur activité.

2. La synthèse organique

2.1. La conception de synthèses organiques semble quasiment impossible jusqu'à bac+2

Quand elle est abordée (n=8), la stratégie de synthèse organique ne fait pas l'objet d'un enseignement spécifique mais elle se fait sur le tas (n= 8). Deux enseignants précisent que cet enseignement n'est pas explicitement au programme en tant que tel. Les enseignants (n=8) abordent cet aspect lors de l'étude des familles et à l'occasion d'exercices d'application pour lesquels les étudiants doivent restituer les équations de réaction qu'ils ont apprises.

> *« Je dirais peu, je ne leur donne pas un produit en leur demandant trois étapes pour y arriver, cela arrive peut être parfois, mais c'est assez rare dans mon enseignement, plus je dirais des réactions à trous pour qu'ils apprennent à jongler avec les réactions mais je pense que cela va trop loin par rapport à ce qu'on leur demande. Déjà s'ils arrivent à assimiler les réactions c'est super. »*
>
> *Cathy, CPGE (annexe, C58)*

Seuls Hélène et Bertrand indiquent qu'ils amènent leurs étudiants de 2ème année à utiliser leurs connaissances acquises depuis deux ans pour critiquer, discuter, construire des synthèses organiques. En effet pour 7 enseignants la stratégie de synthèse organique nécessite tout d'abord de connaître suffisamment de réactions diverses et d'avoir acquis une culture, un recul suffisants, ce qui rend cette activité difficile.

> *« Je dirais pour une synthèse multi-étapes, il faut déjà avoir une grande culture de la chimie organique, comprendre les groupements fonctionnels, comment ils réagissent, etc. Parce que là, cela va faire appel à un mélange de toutes ces connaissances, après il y a aussi l'aspect protection-déprotection qui va être indispensable. […] Donc il leur faut tous ces fondamentaux-là et il leur faut aussi bien sûr tous les fondamentaux des réactivités à proprement parler des différents groupements fonctionnels ou multi-fonctionnels parce qu'après il va y avoir des réactions d'alkylation, etc. C'est dans les constructions de molécules plus complexes après c'est clair que, ils le découvrent au fur et à mesure mais à mon avis il leur faut déjà une bonne culture de la chimie organique à la base sinon à mon avis ils auront du mal à raccrocher les wagons. »*
>
> *Danielle, Université (annexe, D49)*

La stratégie de synthèse organique n'est pas un contenu explicite d'enseignement. Il semble partagé par les enseignants qu'en raison de toutes les connaissances nécessaires à la pratique de la synthèse organique, la conception de synthèses par les étudiants soit difficilement envisageable avant la fin des deux premières années, et que soient possibles principalement des exercices de restitution à trous. Cela est concordant avec le contenu des

livres et des programmes d'enseignement à ce niveau. Nous retrouvons ici le déterminant institutionnel et l'influence du genre professionnel. Nous pensons qu'il s'agit là aussi de l'expression de PCK sur la synthèse organique jusqu'à bac+2 partagées par les enseignants. Il serait alors nécessaire de faire développer d'autres PCK sur la synthèse organique dès la première année.

2.2. Des avis partagés sur la « réactiothèque »

> *« Ça pourrait être un outil effectivement extrêmement intéressant, mais à ce moment-là on… mais pour moi c'est une nouvelle façon de raisonner qui me semble très intéressante. On ne sanctionne pas sur le fait que le gamin ne sache pas passer d'une fonction à l'autre, de toute façon il l'aura cet outil à sa disposition, mais on peut aller beaucoup plus loin justement…*
>
> *Bertrand, STS (annexe, B147)*

Même si 4 enseignants voient un intérêt dans la « réactiothèque » la plupart (n= 6) reste perplexe quant à son utilisation pratique ou son efficacité pour la préparation de l'examen.

> *« L'inconvénient serait que sachant que c'est disponible à l'examen, ils ne fassent pas l'effort de connaître les principales réactions, oui c'est peut être ça en fait, parce qu'en général lorsqu'on leur donne des documents, ils se disent : bon on n'a pas besoin de les connaître, ça serait peut être ça l'écueil. […] L'avantage c'est qu'au lieu de perdre du temps à remonter dans leurs souvenirs, ils pourraient aller peut être un petit peu plus loin dans la démarche et qu'on pourrait donner des exercices un peu plus poussés. Des exercices plus de réflexion plutôt que basés sur la mémorisation des réactions. »*
>
> *Isabelle, Université (annexe, I110-111)*

Notons que la structuration d'une réactiothèque par fonction pourrait permettre à Émilie d'envisager une structuration différente pour son cours.

> *« Et je pense que ça pourrait… oui… à mon avis avec ça, ça permettrait de présenter une progression qui serait différente de la progression A pour laquelle j'ai une petite […] sympathie, plus que pour les autres. »*
>
> *Émilie, STS (annexe, E148-149)*

La « réactiothèque » étant une innovation, les enseignants n'ont pas eu l'occasion de l'utiliser en classe ou lors d'évaluations, ils n'ont donc pas pu construire les PCK associées et nécessaires à son utilisation. Pour la même raison le genre professionnel des enseignants de chimie organique n'intègre pas l'utilisation d'une « réactiothèque ». Enfin le déterminant institutionnel a son importance puisque certains examens et concours son indépendants des enseignants. Tout ceci expliquerait l'observation d'avis partagés sur la « réactiothèque ».

2.3. Comment valider une synthèse organique proposée par un étudiant ?

Hélène signale qu'en faisant travailler ses étudiants sur la production de synthèses organiques, elle se heurte à la difficulté de ne pas savoir si telle proposition d'étudiant sera valide ou non expérimentalement ou industriellement.

> *A- « Quelles sont les difficultés des élèves? »*
> *H- « C'est surtout la difficulté à nous de leur dire par exemple cette voie là expérimentalement ce n'est pas trop faisable, parce que dans l'industrie ça ne va pas se faire, sur le papier ça se ferait, c'est plus dur de leur expliquer. Et eux c'est de mobiliser tout dans tous les sens. Ça me paraît plus dur. »*
>
> *Hélène, STS (annexe, H64)*

Cet exemple est symptomatique de l'absence d'une catégorie de PCK que nous n'avions pas envisagée jusqu'à présent. Elle concerne la gestion par l'enseignant des phases de conclusion avec leurs étudiants (Morge, 2001). Ainsi Hélène est gênée dans l'activité de conception de synthèses car elle se place par rapport à un savoir de référence inaccessible, au lieu d'un ensemble de connaissances et de critères partagés par la classe. Il nous sera donc nécessaire dans la mise en place d'un enseignement de la synthèse organique dès la première année (chapitre II-3) de prévoir des moyens simples et accessibles de valider ou non une proposition de synthèse.

3. Les mécanismes réactionnels

3.1. Le mécanisme réactionnel ou comment l'enseignant raconte une histoire…

En ce qui concerne l'enseignement des mécanismes réactionnels, la totalité des enseignants (n=9) semble réaliser une présentation logique de chaque mécanisme réactionnel : les enseignants racontent une histoire, et justifient a posteriori certains aspects du mécanisme par quelques données expérimentales et éléments théoriques. Aucun des enseignants ne décrit une réelle tâche de construction des mécanismes par les étudiants.

> *« J'essaie, ce n'est pas forcément bien ce que je fais, mais j'essaie toujours de raconter une histoire. Voilà, j'ai ça, j'ai cette molécule, j'ai une autre molécule qui va s'approcher, comment elle va s'approcher ? Selon quel critère ? Électrostatique dans un premier temps, orbitalaire dans un deuxième temps. Comment elle va s'approcher, qu'est-ce qui peut se produire ? J'essaie de construire en fait, et donc j'arrive en fait en expliquant, j'essaie d'expliquer la logique du déroulement d'une réaction chimique, et ensuite je passe aux flèches, au mécanisme. […] Donc j'essaie de montrer le phénoménologique, que quand on fait réagir ça et ça on n'a pas trente six possibilités, mais que l'histoire que je raconte est un fait scientifique. »*
>
> *Bertrand, STS (annexe, B55)*

> *A- « Et sinon pour un mécanisme, par exemple quand tu fais SN2 ou SN1 sur les halogénoalcanes, comment est-ce introduit dans le cours ? »*
> *C- « En fait je mets en évidence avec eux les polarisations, pour pourvoir leur montrer finalement qui est le nucléophile et qui est l'électrophile, et donc qui va attaquer sur qui pour pouvoir prévoir le produit. »*
> *A- « Donc en fait, tu prévois la réactivité à partir de la structure moléculaire. »*
> *C- « Oui. »*
>
> *Cathy, CPGE (annexe, C32-33)*

> *« En CPGE, introduire le mécanisme, pour moi je n'ai pas le temps de leur faire trouver, ça c'est clair. »*
>
> *Franck, CPGE (annexe, F25)*

L'essentiel du raisonnement est traité à l'oral (n= 9) ; au tableau figurent systématiquement (n=9) l'équation de la réaction étudiée, le mécanisme réactionnel symbolisé avec les formules de molécules et les flèches, et souvent sont notés ou dictés (n=7) quelques points ou mots clés.

> *A- « Au tableau qu'est-ce qu'il y a ? »*
> *B- « Il n'y a que les mécanismes. »*
> *A- « Avec le jeu de flèches… »*
> *B- « Absolument, par contre il y a tout le coté explications que je ne note pas au tableau. »*
> *A- « Qui est à l'oral. »*
> *B- « C'est entièrement oral, voilà tout à fait. »*
>
> *Bertrand, STS (annexe, B96-98)*

Nous retrouvons là les résultats de différents auteurs (chapitre I-1), en particulier Loumouamou (1998) et Agrebi (2004), sur l'enseignement des mécanismes réactionnels et du symbolisme associé. Nous interprétons ces résultats par les caractéristiques des PCK dont disposeraient les enseignants et selon lesquelles l'enseignement des mécanismes réactionnels consisterait en une présentation logique et argumentée du déroulement de la

réaction, essentiellement menée à l'oral, et avec comme support une représentation symbolique des espèces chimiques et des déplacements électroniques. Le fait que ces caractéristiques se retrouvent chez tous les enseignants interrogés nous fait considérer qu'il s'agit d'une composante du genre professionnel.

3.2. La construction d'un mécanisme réactionnel par les étudiants est jugée difficile

Lorsque six enseignants sont confrontés à différentes façons d'enseigner les mécanismes réactionnels, cinq d'entre eux jugent intéressante celle qui, selon nous, créé au mieux les conditions d'une modélisation (exemple B en annexe, CD-ROM), car d'après eux elle contient des données expérimentales précises et riches (n=4) et elle ressemble un peu plus à la recherche (n=1). Cependant quatre enseignants sur les six la jugent trop difficile pour introduire un mécanisme avec leurs étudiants.

Sur les neuf enseignants interrogés, trois pensent que laisser les étudiants construire eux-mêmes les mécanismes donnerait n'importe quoi, que les étudiants pourraient proposer d'autres « histoires » ou partir sur d'autres voies. Émilie dit l'avoir déjà observé et donc abandonné.

> *« Je me rappelle la première fois où j'enseignais la chimie organique, comme je dirais je n'avais pas forcément de difficultés à comprendre ce qui se passait, c'était clair dans ma tête, je pensais que très rapidement ça devait être clair dans leur tête à eux, et je suis passée très vite de l'exemple A à l'exemple B, c'est-à-dire en donnant des types d'exercices : j'ai ça et ça, j'obtiens ça, écrire le mécanisme. Et c'est là que je me suis rendu compte que les flèches partaient dans tous les sens sans… je n'avais pas suffisamment insisté sur, à mon avis, site électrophile, site nucléophile et le fait que la flèche représente un déplacement d'électrons. »*
>
> *Émilie, STS (annexe, E32)*

Sept enseignants signalent que des étudiants ont du mal à comprendre la logique du mécanisme ou sont bloqués par rapport à l'utilisation de notions et de définitions de base (électrophile, nucléophile, aspect électrostatique), Émilie et Danielle indiquant même être parfois désemparées face à certains blocages.

> *« La difficulté qu'on voit c'est qu'ils n'ont pas compris… Ils vont mettre des flèches sans aucune cohérence chimique, c'est-à-dire ils vont arracher tel proton parce que cela les arrange, ils ne comprennent pas pourquoi c'est un hydrogène en alpha de la fonction carbonyle qui va réagir, ils ne voient pas pourquoi si on a 2 ou 3 liaisons plus loin… ça je me demande encore pourquoi, j'avoue que…. On voit aussi que dans ce qu'on écrit au tableau et ce qu'ils transcrivent eux, il y a des fois des erreurs, je pense que cela se fait chez les étudiants qui n'ont pas bien tout assimilé, c'est pourquoi je disais qu'il leur fallait des bases de chimie physique, car finalement cette histoire… ou de physique tout court, de l'électrostatique : $\delta+$ $\delta-$, une*

> *charge plus attire une charge moins, ils ne l'analysent pas comme cela et je ne sais pas pourquoi. Pourtant j'essaie dès le départ, mais… »*
>
> *Danielle, Université (annexe, D40)*

Nous observons que tous les enseignants interrogés focalisent systématiquement le raisonnement des étudiants sur quelques éléments théoriques clés : la recherche des sites réactifs et la détermination de leur nature (nucléophile, électrophile), puis les déplacements de doublets électroniques symbolisés par les flèches courbes.

Il semble que face aux difficultés des étudiants dans l'apprentissage des mécanismes réactionnels, les solutions mises en œuvre soient d'éviter de faire découvrir les mécanismes par les étudiants eux-mêmes et/ou de focaliser le raisonnement sur quelques concepts-clés essentiellement moléculaires. Nous interprétons ces résultats au vu des résultats de la partie II. Tout d'abord les tâches visant à laisser les étudiants découvrir par eux-mêmes un mécanisme réactionnel à partir de la seule connaissance des espèces chimiques n'est pas réalisable, ce qui justifie son abandon dans les conditions données. Ensuite en réduisant le raisonnement à quelques concepts-clés nécessaires mais non-suffisants, les enseignants ôtent la possibilité aux étudiants de comprendre tous les choix de l'élaboration du mécanisme et ainsi de pouvoir le retrouver par eux-mêmes.

Nous pensons que ces observations pourraient révéler des caractéristiques de PCK dont disposeraient les enseignants sur l'enseignement des mécanismes réactionnels ainsi que l'absence de PCK relatives à l'enseignement de la modélisation (De Jong, 2003). La focalisation du raisonnement sur quelques éléments théoriques clés est partagée par les enseignants interrogés, ce qui nous permet de considérer qu'il s'agirait là encore d'une composante du genre professionnel. Face aux difficultés des étudiants repérées par les enseignants, la solution n'est pas de réduire le nombre d'éléments théoriques clés à utiliser, mais au contraire de fournir à la classe suffisamment d'éléments théoriques adaptés, de critères opérationnels, de données empiriques afin que les étudiants puissent gérer eux-mêmes de tels raisonnement en faisant le tri parmi les voies possibles : le développement de PCK relatives à la gestion des phases de conclusion (Morge, 2001) semble donc nécessaire.

3.3. La construction des mécanismes nécessite des ressources supplémentaires pour l'enseignant

Franck évoque le manque d'une ressource externe permettant de trouver facilement les données expérimentales sur des exemples simples.

> *« Il me manquerait des données d'exemples sur lesquels ont aurait des faits expérimentaux, mais avec des molécules petites. C'est vrai c'est le Carey-Sundberg qui en donne le plus de ceux-là avec justement, les différents méthyles etc., pour donner les cinétiques etc. »*
>
> *Franck, CPGE (annexe, F129)*

Ainsi les enseignants n'auraient peut-être pas non plus l'accès à des ressources suffisantes pour enseigner les mécanismes réactionnels (données expérimentales pertinentes et adaptées).

4. Conclusion : les possibilités de développement de l'activité des enseignants

Malgré la nature exploratoire de cette partie nous avons pu repérer quelques aspects de l'activité des enseignants sur lesquels il serait pertinent d'agir afin de faire évoluer leur activité.

Nos résultats concernent d'abord la structuration globale des contenus. Par la pratique de l'enseignement par fonction, les enseignants ont construit une structure conceptuelle cohérente qu'il est difficile de déstabiliser. Celle-ci semble partagée par la communauté des enseignants de chimie organique (genre professionnel). Cette composante du genre professionnel est en accord avec la structuration que nous trouvons dans les programmes d'enseignement (déterminant institutionnel). C'est pourquoi nous pensons qu'il faudra apporter de nouvelles PCK sur les inconvénients de la structuration par fonction, mais aussi une nouvelle structuration précisément décrite, argumentée et entrant le plus possible dans le cadre institutionnel.

Ensuite nous nous intéressons au thème de la synthèse organique. Les enseignants semblent partager des PCK qui incitent à reporter à la fin de deuxième année et au-delà, des activités de conception de synthèses organiques par les étudiants. Il leur est essentiellement demandé de restituer des réactions mémorisées pour compléter des synthèses à trous. Là aussi il s'agit d'une composante du genre professionnel qui n'est pas contredite par le déterminant institutionnel (programmes d'enseignement, nature des tâches dans les énoncés d'examens et de concours). Nous pensons qu'il faut faire construire des PCK sur l'enseignement de la synthèse organique dès la première année. L'utilisation de la « réactiothèque » est pour nous un moyen de diversifier les tâches à proposer aux étudiants, même si la limite institutionnelle est forte avec en particulier la nature des examens et des concours. Il faudra aussi envisager de déterminer des critères simples et pertinents

permettant aux étudiants de valider ou non une proposition de synthèse organique. Ainsi devront aussi être développées des PCK relatives à la gestion de phases de conclusion.

Il semble enfin que l'approche actuelle de l'enseignement des mécanismes réactionnels fasse partie du genre professionnel et porte une certaine logique à laquelle les enseignants sont sensibles. Ceci rend difficile de nouvelles approches. C'est pourquoi nous pensons qu'il faudra apporter de nouvelles PCK aux enseignants sur les inconvénients d'une entrée essentiellement moléculaire et prédictive pour l'enseignement des mécanismes réactionnels. Il faudra aussi favoriser le développement de PCK sur l'enseignement de la modélisation avec les étudiants. La validation de mécanismes proposés par les étudiants nécessite l'utilisation de critères opérationnels et de connaissances pertinentes, partagées par la classe : là encore il est important de développer des PCK relatives à la gestion des phases de conclusion.

Les travaux disponibles actuellement sur les PCK devraient fournir les pistes de leur développement.

Forts des résultats obtenus aux partie II et III de notre recherche, ainsi que des résultats bibliographiques de la partie I, nous envisageons maintenant dans la dernière partie de cette thèse, la conception et les premiers tests d'un instrument didactique à destination des enseignants.

Partie IV

Conception d'un instrument didactique pour les enseignants

Chapitre IV-1 \ Cadre de conception et activité instrumentée des enseignants
Chapitre IV-2 \ Résultat de la conception d'un premier artefact pour les enseignants
Chapitre IV-3 \ Résultats d'analyse de l'activité instrumentée des enseignants

Chapitre IV-1

Cadre de conception et activité instrumentée des enseignants

Précédemment nos analyses de l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 nous ont conduit à faire des propositions dans ce domaine. Dans cette dernière partie nous mettons en œuvre certaines de nos propositions à travers la conception d'un instrument didactique à destination des enseignants, dont nous étudierons l'appropriation.

1. Cadre théorique

1.1. Une reconstruction didactique

1.1.1. Des analyses préalables diversifiées

Avant d'aborder une construction didactique, il est utile de réaliser différentes analyses qui fournissent des repères pour l'élaboration de situations d'enseignement-apprentissage.

Dans le cadre de l'ingénierie didactique, Artigue (1988) fonde la phase de conception sur des éléments de didactique générale, des connaissances didactiques déjà acquises en rapport avec le thème étudié, ainsi que sur un certain nombre d'analyses préliminaires. Celles-ci sont orientées selon des dimensions épistémologique (analyse du contenu à enseigner, son histoire, les problèmes auxquels il répond), psycho-cognitive (conceptions et difficultés des élèves, processus cognitifs lors des apprentissages) et didactique (effets de l'enseignement usuel, contraintes).

Pour Méheut (2006) il se dégage aussi de différents travaux récents en didactique des sciences un consensus sur l'importance de certaines analyses préalables : l'analyse des savoirs en jeu et de leurs fonctionnalités, et l'analyse des difficultés d'apprentissage et des conceptions des élèves.

Nous retrouvons donc certains aspects du *« Model of Educational Reconstruction »* (Duit *et al.*, 2005 ; Duit, 2007) que nous traduisons par « Modèle de Reconstruction Didactique ». La première phase de la reconstruction didactique vise à extraire les idées centrales (élémentaires) du contenu scientifique à enseigner et d'en évaluer la portée éducative (vision de la science et de ses processus de construction, importance pour la société). Cette première phase est réalisée en relation étroite avec d'autres investigations : des recherches sur l'enseignement et sur l'apprentissage, le développement et l'évaluation d'instruments didactiques, d'activités d'apprentissage ou de séquences d'enseignement-apprentissage. Duit (2007) englobe ces différents éléments dans un environnement éducatif plus large (buts et contenus de l'enseignement scientifique, place des innovations dans le système scolaire, recherches sur les réformes, résultats d'évaluations internationales, recherches sur le développement professionnel des enseignants, etc.).

C'est pourquoi nous avons jugé utile d'étudier l'enseignement-apprentissage de la chimie organique selon des éclairages multiples à travers les trois premières parties de cette thèse. L'étude bibliographique préliminaire (partie I) nous a permis d'avoir un regard assez large sur ce thème, avec en particulier une connaissance de certaines difficultés des étudiants et de la nature épistémologique de la chimie organique. Notre analyse du savoir à enseigner (partie II) nous a permis ensuite d'en décortiquer le fonctionnement, d'en comprendre certaines limites et ensuite de réaliser des propositions pour sa reconstruction. Enfin nous avons exploré certaines caractéristiques de l'activité d'enseignants de chimie organique (partie III) pour comprendre l'état d'équilibre dans lequel ils se trouvent entre ressources et contraintes, et pour pouvoir réaliser ensuite un déplacement à moindre coût de cet équilibre. Forts de tous ces éléments préalables nous envisageons donc la conception de séquences d'enseignement-apprentissage en chimie organique.

1.1.2. Conception de séquences d'enseignement-apprentissage

Dans le cadre des recherches en didactique les séquences d'enseignement-apprentissage portent en elles un double statut : elles sont un produit de la recherche car elles constituent des innovations visant à résoudre des problèmes repérés dans l'apprentissage d'un contenu précis ; elles sont aussi un outil de recherche visant à produire des connaissances

didactiques. Cependant la plupart des résultats obtenus dans de telles recherches concernent davantage les effets observés (la qualité des apprentissages effectifs) que les relations entre l'enseignement dispensé et l'apprentissage observé (Méheut & Psillos, 2004). Ainsi le terme de « séquence d'enseignement-apprentissage » (Teaching-Learning Sequence ou TLS) permet de souligner ce lien étroit qui existe entre les propositions d'enseignement et les apprentissages attendus pour les élèves.

Il s'agit justement d'un aspect important de l'ingénierie didactique selon Artigue (1988). Les choix réalisés par le chercheur lors de la conception d'une séquence d'enseignement doivent être étroitement associés à une analyse a priori des connaissances élaborées par les élèves. Les choix inscrits dans la séquence sont alors testés lors de la comparaison entre ce qui est prévu dans les analyses a priori et ce qui est effectivement observé chez les élèves. Lors de notre travail de conception nous envisageons de prévoir l'effet de certains de nos choix sur les apprentissages des étudiants mais aussi sur l'activité des enseignants. Artigue (1988) relève en effet que *« si l'élève est pris en compte à un double niveau : descriptif et prédictif, le maître n'intervient, lui, qu'à un niveau descriptif, comme si la situation le déterminait complètement en tant qu'acteur du système »* (p. 296). Négliger les effets de l'enseignant par rapport aux effets de la séquence sur les étudiants constitue alors un problème de validité des résultats que souligne l'auteur.

Ceci justifie notre choix, mis en œuvre dès la partie III, de prendre pleinement en considération l'activité des enseignants.

Afin de caractériser un peu plus nettement les différents types de séquences d'enseignement-apprentissage et d'en négliger aucun des aspects, Méheut & Psillos (2004) proposent de s'intéresser à deux dimensions : la dimension épistémologique s'occupe de comment les connaissances scientifiques s'articulent avec le monde matériel, et la dimension pédagogique concerne le rôle des étudiants et de l'enseignant (fig. ✦34). Si certaines séquences actuellement disponibles sont construites selon l'une ou l'autre dimension, d'autres séquences combinent les deux.

Nous envisageons de prendre en considération les deux dimensions pédagogique et épistémologique lors de notre travail de conception. Nous pensons en effet qu'une transformation de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique passe à la fois par une reconstruction d'ordre épistémologique (modélisation, etc.) et par une gestion pédagogique adaptée à ce nouvel enseignement.

FIGURE ✦ 34 **Les TLS dans le losange didactique**

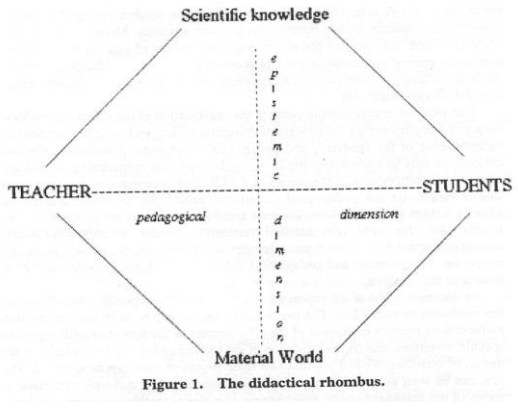


Figure 1. The didactical rhombus.

FIGURE ✦34

Méheut & Psillos (2004) proposent un cadre pour caractériser les séquences d'enseignement-apprentissage (Teaching-Learning Séquence ou TLS) en fonction de deux dimensions croisées : la dimension épistémologique et la dimension pédagogique. Ces deux dimensions constituent les diagonales du losange didactique reproduit ici (p.519). Selon l'axe épistémologique se trouvent les méthodes scientifiques, les processus d'élaboration et de validation des connaissances scientifiques, etc. Selon l'axe pédagogique se trouvent les choix à propos du rôle de l'enseignant, des types d'interactions entre enseignants et étudiants, et proche du sommet Étudiants *les interactions entre étudiants. Les conceptions et les raisonnements naturels des étudiants se situent sur le côté* Étudiants – Monde Matériel*. Le rapport à la science des étudiants se situe quant à lui du côté* Étudiants – Connaissances Scientifiques*. De manière symétrique figurent aussi les conceptions des enseignants sur le monde matériel et leur rapport au savoir scientifique.*

La conception de séquences d'enseignement-apprentissage s'oriente traditionnellement vers l'élaboration de tâches pour les élèves, d'une séance, voire de la séquence entière plutôt que vers une restructuration plus globale (sur une ou plusieurs années) (Kariotoglou & Tselfes, 2000 d'après Méheut & Psillos, 2004).

Nos propositions vis-à-vis du savoir à enseigner (partie II) concernent autant les tâches assignées aux étudiants que la structuration sur deux ans. C'est pourquoi il nous semble nécessaire d'élargir notre cadre théorique en passant de la conception de séquences d'enseignement-apprentissage à la conception d'un instrument didactique intégrant ces différents niveaux.

Il nous faut donc définir ce qu'est un instrument et en particulier sa place par rapport aux apprentissages des élèves et à l'activité de l'enseignant.

1.2. L'enseignement, une activité médiatisée par les instruments

1.2.1. L'instrument didactique est au cœur du losange didactique

L'activité des enseignants est largement tributaire des instruments dont ils disposent : manuels scolaires, logiciels, scénarios didactiques, etc. (Courally, 2007 ; Goigoux, 2005 ; Goigoux, 2007).

Dans le cadre de la psychologie ergonomique Rabardel (1995) modélise les Situations d'Activités Instrumentées par une triade structurée autour du sujet (utilisateur, opérateur..), de l'instrument (l'outil, la machine, le système…) et de l'objet vers lequel l'activité instrumentée est dirigée (fig. ✦35). Ce modèle vise l'analyse de la tâche et de l'activité, en plaçant l'instrument comme un intermédiaire entre le sujet et l'objet, dans un système complexe d'interactions entre ces trois pôles.

FIGURE ✦ 35 **Modèle des Situations d'Activités Instrumentées**

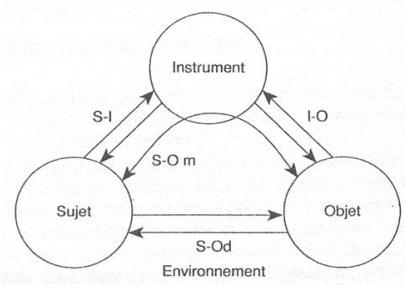


FIGURE ✦35

Dans son modèle Rabardel (1995, p.66) distingue explicitement trois pôles : le sujet (l'utilisateur, opérateur…), l'instrument (l'outil, la machine…) et l'objet vers lequel l'activité à l'aide de l'instrument est dirigée. La modélisation triadique des Situations d'Activités Instrumentées fait apparaître la multiplicité et la complexité des relations et des interactions entre les différents pôles. Au-delà de l'interaction directe sujet-objet (S-Od), il existe d'autres interactions : celle entre le sujet et l'instrument (S-I), celle entre l'instrument et l'objet sur lequel il agit (I-O), ou encore l'interaction entre le sujet et l'objet médiatisée par l'instrument (S-Om). De plus l'ensemble est plongé dans un environnement dont le sujet doit tenir compte dans son activité.

Courally (2007) adapte le modèle précédent pour comprendre la situation d'activité d'enseignement instrumentée (fig. ✦36) : le sujet désigne l'enseignant, l'instrument concerne les instruments didactiques, et l'objet désigne les apprentissages. Ce dernier pôle est composite, il est constitué par les savoirs, les savoir-faire et les élèves. Les instruments didactiques acquièrent alors une place centrale dans le triangle didactique (constitué de l'enseignant, des savoirs et des élèves) et il convient de les examiner selon un triple point de vue : celui des savoirs, celui des élèves et celui des enseignants.

Nous considérons nous aussi que l'activité d'enseignement prend appui sur des instruments didactiques. Ceux-ci ont un statut important au cœur du losange didactique

FIGURE ✦ 36 **Situation d'activité d'enseignement instrumentée**

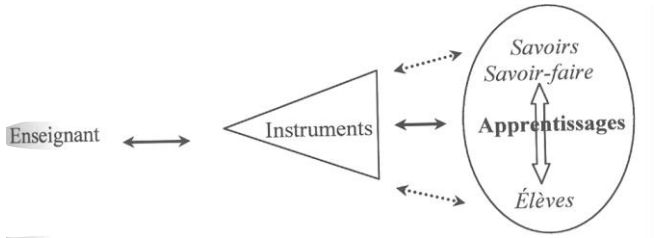


FIGURE ✦36
Courally (2007, p.32) adapte le modèle des Situations d'Activités Instrumentées de Rabardel (1995) au cas de l'enseignement. Le sujet désigne l'enseignant, l'instrument concerne les instruments didactiques, et l'objet désigne les apprentissages. Ce dernier pôle est composite, il est constitué par les savoirs, les savoir-faire et les élèves. Ainsi les instruments didactiques se retrouvent au centre du triangle didactique constitué de l'enseignant, des savoirs et des élèves.

(constitué par les savoirs scientifiques, le monde réel, les élèves, les enseignants) à l'intersection des dimensions épistémologique et pédagogique de l'enseignement-apprentissage.

1.2.2. L'instrument est un artefact associé à l'usage qui en est fait

Selon l'approche de la psychologie ergonomique un instrument peut être défini comme une entité mixte qui tient à la fois de l'artefact, objet matériel ou symbolique créé par l'homme, et du sujet par l'usage qu'il fait de l'artefact (Rabardel, 1995). Le sujet incorpore l'artefact à l'organisation de son activité en construisant des modalités d'usage qui lui sont propres ou en s'appropriant des usages préexistants dans la communauté à laquelle il appartient (Rabardel, 1995 ; Rabardel & Pastré, 2005 ; Goigoux, 2007).

Dans une situation d'enseignement instrumentée, l'artefact peut prendre la forme d'un manuel, d'un logiciel ou encore d'un scénario didactique. L'instrument est alors défini par cet artefact mais aussi par la manière dont l'enseignant utilise l'artefact en classe ou hors de la classe (préparations de cours, corrections, etc.) (Courally, 2007 ; Goigoux, 2007).

La transformation de l'artefact en instrument constitue un processus plus ou moins long de genèse instrumentale, dirigé à la fois vers l'artefact et vers le sujet : l'instrumentalisation désigne le mouvement du sujet vers l'artefact, l'instrumentation désigne le mouvement de l'artefact vers le sujet (Rabardel, 1995). Lors du processus d'instrumentalisation, le sujet sélectionne, regroupe, attribue des fonctions et des propriétés à l'artefact. C'est ainsi que les fonctions et propriétés initialement prévues par le concepteur peuvent être détournées par le sujet. Réciproquement, dans le processus d'instrumentation, l'artefact provoque une

modification de l'organisation interne de l'activité du sujet par des processus d'accommodation ou d'assimilation.

Par conséquent, la genèse instrumentale peut permettre le développement du sujet et/ou de l'artefact. Ce double développement nous semble important pour la suite de notre recherche.

1.2.3. Le développement de l'enseignant lors de la genèse instrumentale

La genèse instrumentale dirigée vers le sujet permet de contribuer au développement professionnel des enseignants.

Goigoux (2007) et Courally (2007) définissent le potentiel de développement des enseignants comme l'intervalle entre ce que les enseignants réalisent ordinairement et ce qu'ils pourraient réaliser au cours d'une genèse instrumentale. L'activité de l'enseignant résulte alors d'une tension entre les exigences de l'instrument et des prescriptions professionnelles d'une part et, d'autre part, les effort faits par l'enseignant pour transformer l'artefact et ses modalités d'usage pour son propre compte (Goigoux, 2007 ; Rabardel, 1995). L'évolution des artefacts influence l'activité de l'enseignant en provoquant l'apparition, la disparition ou la recomposition de tâches didactiques (Goigoux, 2007).

1.2.4. La conception continuée dans l'usage de l'artefact

La genèse instrumentale dirigée vers l'artefact permet au concepteur de mêler efficacement la conception et l'usage de l'artefact (Rabardel, 1995) (fig. ✦37).

Une analyse préalable de l'activité des enseignants permet de concevoir un artefact initial qui ne soit pas trop en décalage avec leurs manières de faire et avec les buts qu'ils se donnent, afin d'éviter un rejet de l'artefact par les enseignants (Goigoux, 2007). La conception du premier artefact n'est que la première étape d'une démarche de *« conception continuée dans l'usage »* (Goigoux, 2007, p.60) qui se poursuit par l'étude de sa mise en œuvre par les enseignants.

L'écart entre l'usage prévu et l'usage réel de l'artefact, voire même son détournement vers un usage imprévu, sont autant d'indices pour le concepteur. Le concepteur met à l'épreuve les hypothèses qu'il a inscrites dans l'artefact initial en les confrontant au monde de l'utilisateur ; le résultat de son travail de conception n'est donc pas définitif (Béguin, 2005 ; Folcher & Sander, 2005). L'artefact initial est alors modifié pour conduire à de

nouvelles versions, issues de compromis entre les nouvelles contraintes identifiées, les interrogations nouvelles et les projets initiaux du concepteur.

FIGURE ✦ 37 **Genèse instrumentale dans la conception d'un artefact**

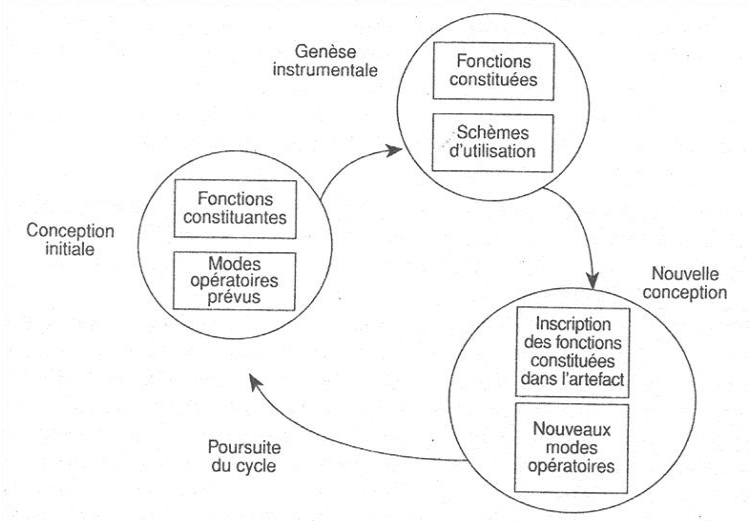


FIGURE ✦37

Pour Rabardel (1995, p.164) il ne faut pas dissocier temporellement la conception et l'usage d'un artefact. En effet la conception se poursuit dans l'usage en genèses instrumentales, par des processus d'instrumentation orientés vers le sujet et des processus d'instrumentalisation qui visent directement l'artefact. Ainsi les « fonctions constituantes » et les « modes opératoires prévus » lors de la conception de l'artefact initial sont modifiés lors d'une genèse instrumentale. Les « fonctions constituées » et les « schèmes d'utilisation » (que nous définissons ici rapidement comme des organisateurs internes de l'activité instrumentée du sujet) peuvent alors être intégrés dans une nouvelle version de l'artefact, et ainsi de suite selon une démarche de conception cyclique.

Ainsi l'enseignant est un acteur à part entière du mouvement d'ensemble de la conception lorsqu'il travaille l'artefact pour l'inscrire dans ses usages, l'adapter à ses caractéristiques personnelles et à sa situation professionnelle. (Courally, 2007). En conclusion *« la conception est distribuée entre les concepteurs et les utilisateurs »* (Courally, 2007, p.40).

A partir de nos études et analyses préalables (parties I, II et III) nous construisons un artefact intégrant certaines de nos propositions à travers différents niveaux didactiques (de la tâche à la structuration du savoir sur 2 ans). Nous tâchons d'articuler nos propositions d'enseignement avec les apprentissages visés selon des dimensions épistémologique et pédagogique. En outre nous nous plaçons dans une démarche de conception continuée dans l'usage afin d'étudier le développement de l'artefact et celui de l'enseignant.

2. Quels effets de la genèse instrumentale ? Question de recherche

Nous avons vu précédemment que lors d'une genèse instrumentale l'utilisateur sélectionne, regroupe, attribue des fonctions et des propriétés à l'artefact, et réciproquement l'artefact provoque une modification de l'organisation interne de l'activité de l'utilisateur. Nous nous posons donc la question suivante.

Q

Quelles sont la nature et l'ampleur des effets de la genèse instrumentale que nous instaurons, sur l'activité des enseignants de chimie organique et sur notre premier artefact didactique ?

Nous souhaitons déterminer comment les enseignants s'approprient l'artefact qui leur est proposé, à savoir ce qu'ils vont garder, mettre de côté ou transformer. Il s'agit aussi de savoir jusqu'où les enseignants peuvent aller dans la transformation de cet enseignement à l'aide de l'artefact. Nous cherchons enfin à comprendre pourquoi nous observons ces effets, que ce soit par rapport à leur activité ou aux caractéristiques de l'artefact lui-même.

H

Nous devrions observer certains des effets attendus lors de la conception de l'artefact, ainsi que d'autres effets que nous n'avons pas anticipés. Cependant nous pensons que ces effets seront limités par les contraintes des prescriptions institutionnelles, ainsi que par le fort ancrage de certaines caractéristiques propres à l'enseignant et au genre professionnel.

Nous cherchons à apporter des éléments de réponse à notre question de recherche en mettant en place une méthodologie particulière que nous présentons ci-dessous.

3. Méthodologie

3.1. Conception d'un premier artefact

Nous avons conçu un premier artefact en tâchant de concilier construction didactique et activité instrumentée des enseignants selon les cadres théoriques présentés précédemment.

Si son principal statut est d'être à terme un document ressource à destination des enseignants, il est surtout dans un premier temps un outil de recherche visant à obtenir des

résultats supplémentaires sur l'activité des enseignants de chimie organique. C'est pourquoi nous avons osé certains choix un peu plus risqués que ne l'autorisaient les résultats de la partie III sur l'activité des enseignants, afin d'estimer jusqu'où les enseignants pouvaient aller à l'aide de l'artefact. L'artefact est donc pour le moment davantage un outil de recherche et de formation qu'un outil d'enseignement utilisable tel quel.

Une description détaillée de l'artefact, de nos choix et de l'analyse a priori réalisée (Artigue, 1988) est présentée dans le chapitre IV-2. L'artefact lui-même constitue un partie du tome 2 (annexes) joint à ce compte-rendu de recherche.

3.2. Premières utilisations de l'artefact par des enseignants

Une journée de test a été organisée le 15 juin 2009 avec 8 enseignants volontaires (fig. ✦38).

L'artefact (annexe), une lettre d'accompagnement et un questionnaire dit de « premières impressions » (annexe, CD-ROM) ont été remis aux enseignants 8-10 jours avant la journée de travail. Ce délai un peu court ne résulte pas d'un choix délibéré ; il est une conséquence de la planification de la thèse et de discordances entre plannings.

La lettre d'accompagnement de deux pages présente tout d'abord le contexte de la genèse de l'artefact c'est-à-dire la justification et les grandes lignes de notre travail de recherche. Les enseignants sont conviés à une journée de travail en tant qu'experts de cette discipline et de cet enseignement, afin de déterminer si notre nouvelle approche est pertinente et dans quelle mesure elle serait faisable avec leurs étudiants. Dans un premier temps ils doivent prendre connaissance de l'artefact et doivent noter leurs premières impressions à l'aide du questionnaire joint. Enfin est décrit le programme de la journée de travail et ce qu'ils peuvent amener (un ou deux livres préférés, documents de cours, etc.).

3.2.1. Corpus préliminaire : questionnaire « premières impressions »

Chaque enseignant doit remplir individuellement le questionnaire « premières impressions » au moment de la découverte de l'artefact. Ce questionnaire vise à estimer leur degré d'adhésion initial à l'artefact et des propositions qu'il contient.

Les quatre questions sont volontairement ouvertes et concernent respectivement : l'impression générale et les premières réactions de l'enseignant lorsqu'il découvre l'artefact, ce qui lui semble intéressant et ce avec quoi il est en accord, inversement ce qui lui pose problème et ce avec quoi il est en désaccord, enfin les questions que l'enseignant se pose en parcourant le document et auxquelles il aimerait avoir des réponses.

FIGURE ✦ 38 **Les enseignants qui ont participé au test de l'artefact**

Binômes	Enseignement au moment du test	Ancienneté dans l'enseignement supérieur de la chimie au moment du test
Cathy & Noël	CPGE (BCPST1)	8 ans
	CPGE (BCPST2)	5 ans
Danielle & Kristian	Université	16 ans
	Université	13 ans
Muriel & Franck	STS Chimiste	13 ans
	STS Chimiste	5 ans
Gaëlle & Hélène	STS Chimiste	10 ans
	STS Chimiste	12 ans

FIGURE ✦38
Le tableau donne un profil succinct des enseignants ayant participé au test de l'artefact. Chacun a rempli le questionnaire « premières impressions » au moment de la découverte de l'artefact. Puis une simulation de préparation de cours en binômes a été organisée.

3.2.2. Corpus principal : enregistrement et transcription d'une simulation de préparation de cours avec l'artefact

La matinée du 15 juin 2009 a été consacrée à une simulation de préparation de cours.

Les enseignants sont associés en binômes en fonction de la formation dans laquelle ils enseignent (STS, CPGE ou Université) (fig. ✦38).

Une feuille de consignes est donnée et présentée aux enseignants (annexe, CD-ROM). Il s'agit d'une simulation pour laquelle les enseignants se situent à un moment de l'année scolaire à leur convenance (1ère ou 2ème année post-bac, début ou fin) et pendant laquelle ils doivent réaliser une (ou deux séances) de cours pour la semaine suivante. Les enseignants doivent se plier à un cahier des charges précis : inclure dans leur cours l'étude du mécanisme réactionnel d'hydrolyse basique des esters, proposer un cours réalisable avec leurs étudiants et justifiable auprès de l'institution, collègues, etc., se mettre le plus possible dans l'esprit du document fourni avec en particulier l'exemple de la séquence n°3 qui porte justement sur l'hydrolyse basique des esters, produire un cours pour deux (avec éventuellement des

variantes en cas de désaccord). Ils disposent pour cela des ressources qu'ils ont choisi d'amener ainsi que de l'accès à des ordinateurs, à Internet et de nombreux livres de chimie organique.

Les enseignants sont placés par deux afin que nous puissions accéder à leurs choix et arguments (Morge, 2004). Les échanges au sein de chaque binôme sont enregistrés en audio puis transcrits avant d'être analysés. Chaque locuteur est identifié au moyen d'une lettre suivie d'un numéro correspondant à l'ordre des prises de parole. Nous affectons à chaque enseignant l'initiale de son pseudonyme (F pour Franck, etc.) et nous nous réservons la lettre A.

A l'aide du cahier des charges nous provoquons le phénomène d'appropriation de l'artefact par les enseignants et nous observons ce qui se passe. Dans le cahier des charges nous précisons que le cours proposé doit être « réalisable » et « justifiable » pour que les enseignants soient le plus possible en simulation de préparation d'un vrai cours. Le choix du thème (hydrolyse basique des esters) est tel qu'il puisse être intégré facilement dans leur cours actuel, mais s'ils veulent suivre au plus près l'esprit de l'artefact ils devront bousculer au moins en partie leur progression ou encore prévoir des phases de validation par les étudiants, etc. Ainsi la tâche qui leur est donnée est très précise mais nous nous attendons à ce que les enseignants l'élargissent pour aborder d'autres aspects de l'artefact. En précisant qu'ils doivent se rapprocher « le plus possible » de l'esprit du document nous leur laissons la possibilité de se détourner plus ou moins des suggestions de séquences et de l'esprit de l'artefact.

Notre posture initiale est d'être le garant du respect des consignes et de faire expliciter des choix le cas échéant. En pratique nous avons dû aussi rassurer les enseignants qui s'inquiétaient de passer beaucoup de temps à discuter de l'artefact au lieu de produire le cours demandé. Et nous avons dû répondre à certaines de leurs questions visant à faire expliciter certains de nos choix ou certains aspects de l'artefact. Nous sommes conscient du risque ainsi pris de biaiser un peu nos observations.

Si la simulation de préparation de cours est un moyen utilisé pour caractériser des PCK (De Jong, 1998), ce type d'activité ainsi que des échanges entre enseignants peuvent aussi favoriser le développement de PCK (De Jong, 1998 ; Van Driel *et al.*, 1998). Il s'agit donc là d'une limite méthodologique puisque le développement de PCK pourrait provenir de la genèse instrumentale et/ou des modalités du recueil de données.

Précisons enfin que pendant l'après-midi a été organisée une discussion collective avec les 8 enseignants sur le travail du matin et sur certains aspects de l'artefact. Toute la discussion a été enregistrée (en audio et vidéo). Ce corpus très riche lui aussi, n'a pas été traité pour le moment.

3.2.3. Lignes d'analyse des corpus

A l'aide des questionnaires « premières impressions » nous évaluons le degré d'adhésion initial des enseignants à l'artefact que ce soit sur le fond ou sur la forme.

Puis nous analysons les transcriptions des simulations en recherchant les indices d'effets de la genèse instrumentale que ce soit sur l'activité des enseignants (modification de leur activité, développement de PCK) ou sur l'artefact (éléments de l'artefact qui sont intégrés, rejetés, transformés ou détournés). Nous tâchons d'interpréter les résultats obtenus par rapport aux déterminants de l'activité de l'enseignant, les PCK et le genre professionnel.

Tous ces résultats sont détaillés dans le chapitre IV-3 dont la conclusion fournit quelques propositions de développement de l'artefact et de l'activité instrumentée des enseignants.

Chapitre IV-2

Résultat de la conception d'un premier artefact pour les enseignants

Nous présentons dans ce chapitre le résultat de la conception initiale de l'artefact (annexe), en justifiant certains de nos choix a priori. Nous ne pouvons pas communiquer ici l'intégralité de l'analyse a priori du fait de sa longueur.

> *« Une analyse a priori, du fait de sa longueur, a fortiori lorsqu'il s'agit d'un travail de macro-ingénierie, est pratiquement incommunicable in extenso. Ce qui est publié et visible de l'extérieur, n'est donc pas, sauf exercice d'école, un produit conforme à la description théorique qui en a été faite ici, mais un condensé de ce produit. Des choix sont faits et le contrôle extérieur qui peut être apporté par la communauté sur la démarche de validation s'en trouve nécessairement affecté. »*
>
> *Artigue, 1988, p.297*

1. L'introduction et le sommaire

L'introduction vise simplement à resituer le contexte de la genèse de l'artefact pour tout lecteur (un travail de thèse, sa justification et les axes de l'étude). Elle présente aussi le statut de l'artefact, c'est-à-dire qu'il est à la fois un document ressource pour les enseignants et un support pour un travail de recherche avec eux. Enfin elle délimite sa portée : il s'agit d'un document de travail, provisoire et donc imparfait ; il est centré sur le cours de chimie organique (sans en négliger les aspects expérimentaux) ; il est présenté du point de vue des contenus disciplinaires en laissant l'organisation pédagogique à la charge des enseignants. Notons toutefois que nos choix de tâches, de documents, etc. orientent nécessairement certaines pratiques pédagogiques.

Quant au sommaire, plus qu'un simple outil de repérage dans le document, il en offre une vision synthétique. En effet nous nous sommes attaché à le rendre compréhensible en soi,

c'est-à-dire qu'à travers la lecture des titres et des sous-titres, le lecteur commence déjà à s'imprégner et à se faire une idée de l'esprit de notre approche alternative.

L'artefact est constitué d'un argumentaire initial, d'un exemple de progression, de quatre exemples de séquence ainsi que de ressources bibliographiques en annexes. Nous détaillons maintenant chacune de ces parties en expliquant certains de nos choix et en tâchant d'anticiper les effets de ces choix.

2. L'argumentaire initial : pourquoi une approche alternative ?

La première partie du document est un argumentaire de dix pages à destination des enseignants (artefact, pp.4-13). Il vise à leur faire comprendre pourquoi il est nécessaire d'après nous d'envisager une transformation de l'enseignement de la chimie organique et en quoi nos axes de reconstruction peuvent être pertinents.

2.1. Une entrée par les difficultés d'apprentissage des étudiants

Nous avons choisi de commencer l'argumentaire par la référence aux difficultés d'apprentissage des étudiants. Lors de notre étude exploratoire de l'activité des enseignants (partie III) nous nous sommes rendu compte que les enseignants étaient très préoccupés par les difficultés de leurs étudiants et que ces dernières leur servaient à justifier leurs choix didactiques. Nous présentons quelques résultats de l'étude des représentations de la chimie organique chez les étudiants, ainsi que des citations d'étudiants (Loumouamou, 1998). Nous avons décrit en particulier le cas de Parker, un très bon étudiant qui échoue en chimie organique (Anderson & Bodner, 2008).

Nous espérons ainsi attirer l'attention et augmenter l'intérêt des enseignants pour la suite de l'argumentaire. En outre différents travaux sur les PCK et leur développement par les enseignants prennent appui sur des réponses authentiques d'élèves (Autain Kermen, 2007 ; Morge, 2003 ; Van Driel *et al.*, 1998). Nous envisageons déjà de développer cet aspect par la suite grâce à des travaux de recherche ultérieurs dans lesquels nous intégrerions les étudiants de chimie organique.

2.2. L'origine de la structuration par famille et ses conséquences

La suite de l'argumentaire s'intéresse à la structuration globale du savoir en chimie organique. L'approche est historique afin de montrer comment s'est construite cette structuration et sur quelles fondations. Nous utilisons des citations de chimistes du XIXe

siècle et des sommaires d'ouvrages anciens ; cette partie est inspirée des travaux de Terrien (1998). L'intégration de sommaires d'ouvrages plus récents montre le maintien actuel de la structuration ancienne par familles de molécules organiques.

Puis nous apportons des éléments épistémologiques sur le développement de la chimie organique au XXe siècle (Loumouamou, 1998). Nous souhaitons mettre ainsi les enseignants face au problème de la progressivité de l'apprentissage des concepts théoriques actuels dans une structuration globale héritée de l'histoire. Un de nos résultats de l'analyse du savoir à enseigner (partie II) nous permet d'illustrer le problème : il s'agit de la diversité des mécanismes réactionnels et des éléments théoriques inclus dans le chapitre des alcènes, traditionnellement traité assez tôt dans la structuration classique. Des citations de Libby (1991) renforcent l'argumentaire sur ce point.

L'approche par l'histoire et l'épistémologie de la chimie organique permet d'enrichir les connaissances des enseignants et constituent des éléments utiles au développement de leurs PCK.

2.3. Les fondements et les axes de la reconstruction de cet enseignement

Nous terminons l'argumentaire en resituant l'enseignement de la chimie organique par rapport à la chimie organique telle qu'elle se fait actuellement. Pour cela nous citons des chimistes tels que le prix Nobel de chimie E. J. Corey et nous donnons un extrait du sommaire de *The Journal of Organic Chemistry*. Nous voulons rappeler aux enseignants qu'une des principales finalités des métiers de la chimie organique est la synthèse d'espèces chimiques organiques, mais que tout problème de synthèse organique est complexe et multifactoriel. Ces problèmes nécessitent de répondre à diverses questions que nous citons, et pour lesquelles les chimistes organiciens ont une grande diversité de réponses (empiriques ou théoriques) mais partiellement efficaces.

Il s'agit pour nous d'apporter à nouveau aux enseignants des connaissances sur la nature épistémologique de cette discipline, tout en faisant le lien avec la difficulté pour les étudiants de ne pas disposer d'une démarche bien balisée, algorithmique ou mathématique.

Nous affichons enfin nos axes fondateurs de la reconstruction d'un enseignement de la chimie organique (chapitre II-3) : introduire des premières notions de synthèse organique dès la première année, organiser explicitement le savoir à enseigner par rapport aux

questions que se pose le chimiste organicien en privilégiant une progressivité dans les questions posées et les réponses apportées (modèles et concepts théoriques), montrer que les modèles scientifiques ne sont pas des dogmes mais qu'ils sont hypothétiques, évolutifs et pertinents pour certains problèmes (Martinand, 2002), et enfin permettre aux étudiants de pouvoir valider par eux-mêmes les stratégies de synthèse organique et les mécanismes réactionnels qu'ils proposent en fonction des critères et connaissances disponibles.

Nous mettons ainsi clairement en avant certaines PCK que nous souhaitons faire développer autour de l'enseignement de la modélisation, l'enseignement de la synthèse organique dès la première année ou la validation de productions d'étudiants par rapport à un savoir de référence partagé par la classe (Morge, 2001).

Nous souhaitons que cet argumentaire convainque les enseignants de l'intérêt de notre démarche ou tout au moins qu'il les incite à se poser des questions sur leurs pratiques dans l'enseignement-apprentissage de la chimie organique.

3. Un exemple de progression sur deux ans

Nous proposons dans l'artefact une structuration du savoir à enseigner sur deux ans (artefact, pp.14-19). Nous souhaitons que la progression ainsi proposée permette aux étudiants d'avoir une représentation positive et actuelle de la chimie organique, tout en comprenant la nature et la fonction des éléments théoriques et des modèles utilisés.

Notre progression est constituée de 6 parties dont le détail est présenté à l'aide de tableaux. Nous avons choisi une présentation proche de certains programmes d'enseignement à laquelle les enseignants sont habitués. Des bulles sont ajoutées pour apporter quelques précisions à l'enseignant.

3.1. Des questions portent la structure d'ensemble

Afin de donner du sens au savoir à enseigner et de replacer explicitement l'enseignement de chimie organique en phase avec les questions que se posent les chimistes organiciens, nous déclinons les titres et sous-titres des parties en autant de questions.

Chaque question appelle ainsi une réponse constituée par des éléments du savoir à enseigner nécessaires et suffisants pour répondre à cette question (fig. ✦39, p.130). Une question n'est pas un prétexte artificiel pour introduire tout un pan du savoir habituellement

enseigné ; nous ne conservons de ce dernier que les éléments pertinents vis-à-vis de la question posée. Il nous faut cependant nuancer notre propos car nous avons tenté de composer avec une contrainte majeure que nous nous sommes imposée lors de la conception : conserver l'essentiel du contenu des programmes d'enseignement actuels.

3.2. La synthèse organique et les mécanismes réactionnels sont enseignés par approfondissement successifs

La succession des différentes parties suit l'idée d'une progression en spirale (Gravert, 2006 ; Grove *et al.*, 2008 ; Minter & Reinecke, 1985 ; Sartoris, 1992). Il s'agit pour nous de traiter les thèmes de la synthèse organique et des mécanismes réactionnels par approfondissements successifs, avec l'incorporation de notions supplémentaires et plus poussées en fonction des nouveaux problèmes qui apparaissent au fil de la progression. Ainsi à chaque boucle de la spirale nous revenons au thème de la synthèse organique ou des mécanismes réactionnels mais en approfondissant certaine notions ou en introduisant de nouveaux aspects. Nous présentons maintenant chacune des 6 parties constituant notre exemple de progression. Pour plus de détail il faut se référer à l'artefact lui-même (artefact, pp.14-19).

3.2.1. Partie 1 : Comment séparer et identifier des espèces chimiques organiques ? Relations structures – propriétés physiques

La première partie pose la question de savoir séparer et identifier des espèces chimiques organiques. Il s'agit de permettre aux étudiants d'approfondir leur connaissance de la structure des espèces chimiques organiques avant d'envisager leur transformation chimique (Solomonidou & Stavridou, 1994). Ce sont essentiellement les relations entre la structure des espèces chimiques et leurs propriétés physiques qui sous-tendent cette partie. C'est ainsi l'occasion de faire un lien avec certaines techniques expérimentales traditionnellement associées à l'enseignement de la chimie organique (analyses spectroscopiques, mesures de températures de changement d'état, extractions par un solvant, chromatographies). Les éléments théoriques introduits dans cette partie concernent essentiellement la structure des espèces chimiques dans le modèle de Lewis (élargi à la mésomérie) ainsi que le caractère dynamique de ces structures (polarisation et polarisabilité des nuages électroniques). Ce caractère dynamique est nécessaire pour expliquer certains phénomènes socio-moléculaires (modèle des liaisons intermoléculaires) et permet de poser des jalons pour l'étude de la réactivité dans la partie 3.

La place en début de progression des spectroscopies de RMN, IR, UV-visible et SM risque de poser problème aux enseignants. Comme nous le précisons dans la progression qui leur est fournie, il s'agit d'une « approche expérimentale des analyses spectroscopiques » (tome 2, p.14), ce n'est donc pas un cours approfondi sur le principe théorique de chacune de ces spectroscopies. Mais il est probable que cette précision ne suffise pas à empêcher les enseignants de voir derrière les termes « RMN, IR, UV-visible, SM » (tome 2, p.14) tout le wagon de notions qu'ils ont l'habitude d'enseigner lors des cours correspondants. Comme le dit joliment Chevallard (1986) les enseignants, en regardant le cadre à demi-vide du programme, voient un tableau déjà peint. A leur décharge nous n'avons placé nulle part ailleurs dans notre progression les approfondissements théoriques sur les spectroscopies afin de ne pas perdre notre fil conducteur de la synthèse organique. Ceci pourrait donc leur laisser penser que le cours de spectroscopie propre à la chimie organique doit être fait au seul moment de la progression où il est mentionné.

3.2.2. Partie 2 : Qu'est-ce qu'une stratégie de synthèse organique ?

Cette partie vise la description de la stratégie de synthèse organique. Il s'agit alors d'aborder les transformations chimiques en se plaçant dans un premier temps à un niveau empirique : aménagements structurels et fonctionnels, agencement de transformations chimiques dans une synthèse multi-étapes, critères empiriques tels que le coût ou l'impact sur l'Homme et l'environnement pour choisir une synthèse, élaboration de synthèses simples à l'aide d'une base de données et de transformations chimiques clés. Cette sorte de « bricolage » des transformations issues d'une base de données montre ses limites lorsqu'on envisage des synthèses plus complexes. Il devient alors nécessaire de mieux comprendre ce qui se passe lors des transformations chimiques, c'est justement l'objet de la partie 3.

3.2.3. Partie 3 : Que se passe-t-il pendant une réaction de chimie organique ? Notion de mécanisme réactionnel

Sans réaliser une présentation a priori de tous les outils théoriques utiles en chimie organique, cette partie se borne à poser quelques premières notions suffisantes pour élaborer des mécanismes ioniques. C'est l'occasion d'étudier les réactions acido-basiques en chimie organique et d'introduire un critère de leur prise en compte (Grossman, 2008 ; Isaacs, 1992 ; March, 2001 ; Scudder, 1992 ; Scudder, 1997) que nous ne trouvons pas explicitement dans le savoir à enseigner actuel (partie II de notre thèse). Le modèle des effets électroniques est lui aussi introduit pour prévoir l'acidité relative de deux espèces en l'absence de données tabulées. Cette partie vise surtout l'introduction des mécanismes

réactionnels en la fondant sur des éléments structuraux tels que les ruptures et formations de liaisons, la notion de donneur-accepteur (Scudder, 1992) ainsi que le critère thermodynamique du ΔpKa (Salatin & Jorgensen, 1980 ; Scudder, 1992 ; Scudder, 1997 ; Straumanis, 2008).

Nous limitons volontairement la part des modèles liés à la structure moléculaire et nous l'associons à un critère thermodynamique afin d'éviter les effets d'une approche exclusivement moléculaire (partie I de notre thèse). Nous pensons que les enseignants, habitués à utiliser essentiellement des critères moléculaires, risquent d'accueillir tièdement la limitation de ces critères, surtout au profit d'un critère jusque là inconnu dans l'enseignement français. Nous espérons malgré tout qu'ils réaliseront l'intérêt de ce critère thermodynamique dans les exemples de séquence n° 3 et 4.

3.2.4. Partie 4 : Comment concevoir une stratégie de synthèse organique ? Notions de rétrosynthèse et de chimiosélectivité

En se fondant sur les concepts abordés précédemment, la partie 4 va plus loin sur le thème de la synthèse organique avec en particulier la question de la synthèse d'une molécule cible. Quelques notions de rétrosynthèse peuvent être introduites, telles que les critères de choix de liaisons stratégiques (Smith, 1990) et les notions de synthons donneurs et accepteurs (en lien avec la partie précédente). D'autres problèmes de sélectivité se font jour avec quelques solutions d'ordre empirique : choix d'un réactif sélectif, protection-déprotection d'un groupe fonctionnel, modification de la qualité d'un groupe partant (avec le réinvestissement du critère du ΔpKa).

Les enseignants pourraient s'inquiéter de voir dès les deux premières années des notions habituellement traitées en fin de licence ou en master. C'est pour cela qu'une bulle a été ajoutée pour préciser qu'il s'agit seulement d'une première approche sur quelques exemples et que les étudiants pourront approfondir ces thèmes s'ils poursuivent leurs études en chimie organique.

3.2.5. Partie 5 : Comment prévoir et modifier l'efficacité d'une transformation d'espèce chimique ? Approches thermodynamique et cinétique

La partie 5 permet d'approfondir le problème de la sélectivité au niveau réactionnel afin de trouver des solutions et des applications pour la synthèse organique. Elle est centrée sur des notions thermodynamiques et cinétiques plus poussées que dans les parties précédentes : enthalpie libre de réaction et sélectivité thermodynamique, postulat de

Hammond et sélectivité cinétique, contrôle cinétique et contrôle thermodynamique dans le cas de compétitions (Jullien *et al.*, 1998).

Nous introduisons par exemple des méthodes d'estimation de l'enthalpie libre de réaction, d'additivité des incréments de groupe, etc. afin de mieux articuler les éléments théoriques avec le registre empirique. Il nous semble que l'utilisation de la thermodynamique en chimie organique est assez découplée de ce qui se fait usuellement en cours de thermodynamique chimique où des calculs thermodynamiques sont réalisés à partir de données tabulées. En outre les diagrammes énergétiques de chimie organique nous semblent être utilisés de manière plutôt formelle, sans construction de leur signification à partir de données thermodynamiques, ce qui pourrait réduire leur compréhension par les étudiants.

Le déplacement de toutes ces notions par rapport à la progression par fonction risque de poser problème aux enseignants. En effet ces outils théoriques thermodynamiques et cinétiques sont placés ici en fin de progression ce qui empêcherait les enseignants de présenter certaines caractéristiques de réactions usuellement traitées en début de progression : par exemple des aspects énergétiques des mécanismes réactionnels pour les alcanes, les alcènes ou encore les dérivés halogénés.

3.2.6. Partie 6 : Comment contrôler la stéréochimie d'une transformation d'espèce chimique ? Notions de stéréosélectivité et stéréospécificité

Enfin la partie 6 se focalise sur les problèmes de stéréosélectivité avec des notions de stéréochimie et l'étude de mécanismes nécessitant l'utilisation de la plupart des éléments théoriques introduits précédemment (mécanismes S_N2, S_N1, E1 et E2, etc.)

Là encore nous pensons que le déplacement de la stéréochimie à la fin de la progression pourrait poser problème aux enseignants : nous avons pu l'observer lors des entretiens de Cathy et Gaëlle à propos des progressions qui leur étaient soumises (partie III). En effet cette partie est habituellement traitée dès le début du cours de chimie organique, ce qui permet aux enseignants d'utiliser ces notions dès qu'ils estiment en avoir besoin au fil de l'étude des réactions associées à chaque fonction. Cependant il ne faut pas oublier que les étudiants ont appris au lycée quelques éléments de représentation spatiale des molécules.

Nous avons placé les mécanismes S_N2 S_N1, E1 et E2, usuellement associés aux premières fonctions monovalentes (dérivés halogénés et alcools), en toute fin de notre progression afin qu'ils puissent être traités en combinant toutes les notions apprises dans les parties

précédentes. Les enseignants risquent par conséquent de se demander comment ils pourraient traiter les S_N à la partie 3 sans pousser le détail jusqu'à la distinction entre S_N2 et S_N1, comme ils ont l'habitude de le faire. Inversement les enseignants pourraient être étonnés de devoir traiter certains mécanismes liés aux dérivés carbonylés et aux dérivés d'acide dès la partie d'initiation aux mécanismes réactionnels (partie 3) alors que dans la progression par fonction la réactivité de ces composés n'est traitée que plus tard lorsque toutes les bases mécanistiques ont déjà été posées.

FIGURE ✦ 39 **Extrait de l'exemple de progression présenté dans l'artefact**

Partie 3 : Que se passe-t-il pendant une réaction de chimie organique ? Notion de mécanisme réactionnel.

Principaux apprentissages visés	*Principaux prérequis et réinvestissements*
Comment évaluer le rôle des réactions acido-basiques en chimie organique ?	
Propriétés acido-basiques des principales espèces chimiques rencontrées en chimie organique.	
Critère de prise en compte des réactions acido-basiques en chimie organique. Principe de réversibilité microscopique. En l'absence de données de pKa, prévision de l'acidité relative de deux couples acido-basiques, avec le modèle des effets électroniques. Limites du modèle : influences du milieu.	Réactions acido-basiques. Constante d'équilibre Ka *[Lyc] [Chimie générale]* Modèle de Lewis et mésomérie. Liaisons polarisées et polarisables *[Partie 1]*
Comment expliquer ou prévoir une réaction de chimie organique ?	
Exemples de synthèses organiques. Quelques transformations des dérivés carbonylés, des dérivés d'acides, des dérivés halogénés ou des alcools et époxydes.	Modifications dans l'espèce chimique principale. Aménagements fonctionnels et structurels *[Partie 2]*
Modifications de liaisons au niveau du site réactif de l'espèce chimique principale. Classe d'une transformation : addition, élimination, substitution, transposition.	Réactions inverses d'estérification et d'hydrolyse. Réaction de saponification *[Lyc]* Isotope *[Lyc]*
Modèle d'une réaction ionique par une interaction donneur-accepteur, qualité du groupe partant (critère du ΔpKa). Symbolisme de la flèche courbe.	Interactions favorables entre deux charges électriques opposées *[Clg-Lyc]*, entre deux dipôles *[Partie 1]*
Choix d'un mécanisme réactionnel cohérent avec les données expérimentales. Prévision d'une réaction chimique cohérente avec les connaissances et les critères disponibles.	

Les exemples de séquence n°3 et n°4 disponibles dans ce document, sont conçues dans l'esprit de cette partie.

Ce critère est ajouté explicitement au contenu à enseigner, afin de permettre des prévisions de réaction chimique. Voir les exemples de séquence n°3 et n°4.

FIGURE ✦39

La figure reproduit la page 16 de notre artefact (annexe). Il s'agit de la partie 3 de la progression. Nous observons la formulation des titres sous formes de questions, l'explicitation des principaux apprentissages visés ainsi que des principaux prérequis et réinvestissements. Enfin le matériau empirique sur lesquelles portent les questions est mentionné en italique afin de le distinguer des notions donnant des éléments de réponse aux questions (cet artifice de présentation est explicité dès la partie 1 de la progression à l'aide d'une bulle).

3.3. L'affichage des apprentissages visés et réinvestis renforce le maillage conceptuel de la progression

Chaque sous-partie est déclinée en principaux apprentissages visés. Des apprentissages effectués au lycée ou en chimie générale sont réinvestis explicitement à certains moments de la progression dans la perspective de nouveaux apprentissages. Les apprentissages visés dans une partie sont réinvestis explicitement dans une partie ultérieure. Ceci apparaît par exemple dans le descriptif de la partie 3 que nous reproduisons à la figure ✦39. Nous voyons ainsi dans la colonne de droite que des notions issues du lycée et/ou du cours de chimie générale, ou encore des parties 1 et 2 de notre progression, sont réinvesties lors des apprentissages de la partie 3.

Nous pensons que les enseignants comprendront qu'il est très difficile de transférer ponctuellement certaines de nos propositions sans perdre le bénéfice du maillage conceptuel que nous avons élaboré. Une transformation efficace de cet enseignement ne peut passer que par sa restructuration globale (cf partie II de notre travail ainsi que Loumouamou, 1998). Un risque important est que les enseignants pourraient fonctionner en (quasiment) tout ou (quasiment) rien par rapport à notre progression : soit ils reprennent l'essentiel de notre progression à leur compte, soit ils la délaissent en grande partie.

3.4. L'enseignement des réactions elles-mêmes passe au second plan

Nous estimons que les enseignants pourraient être perturbés par la disparition apparente de l'étude systématique des réactions et de toutes leurs caractéristiques. En effet le savoir à enseigner actuellement est clairement sous-tendu par la connaissance des réactions et de leurs caractéristiques (partie II de notre thèse) alors que notre progression ne l'affiche plus directement. En effet les réactions chimiques pour nous sont davantage des outils que des objets d'enseignement en tant que tels. Nous discuterons et nous nuancerons quelque peu ce point lors de la présentation de l'exemple de séquence n°2.

3.5. L'enseignement de la modélisation est mis en perspective

Au sein de chaque partie nous nous efforçons de distinguer d'une part le matériau empirique (en italique) sur lequel portent les questions, et d'autre part les notions visées constituant des éléments de réponse (fig. ✦39).

Nous insistons sur la fonction d'explication et de prévision des modèles à travers l'enseignement du *« modèle des liaisons intermoléculaires […] pour expliquer et prévoir des*

différences de propriétés physiques » (partie 1 du tome 2, p.14). L'enseignement du critère du ΔpKa permet lui aussi des prévisions de réactions chimiques, ce qui représente une nouveauté (partie 3). L'enseignement du modèle des effets électroniques (partie 3) pour prévoir l'acidité relative de deux couples acido-basiques inclut la notion de domaine de validité d'un modèle à travers l'enseignement explicite d'une des limites de ce modèle : l'influence du milieu.

Nous intégrons dans le savoir à enseigner de la partie 3 l'apprentissage du *« choix d'un mécanisme réactionnel cohérent avec les données expérimentales »* (tome 2, p.16) ainsi que celui de la *« prévision d'une réaction chimique cohérente avec les connaissances et les critères disponibles »* (tome 2, p. 16). Du point de vue des étudiants il ne s'agit plus de simples objectifs en termes de connaissances disciplinaires mais aussi de capacités et finalement de compétences[1] en rapport avec la modélisation. Du point de vue des enseignants ces objectifs incitent à la construction de PCK sur l'enseignement de la modélisation en classe et la gestion des phases de conclusion.

3.6. Le symbolisme est explicitement un objet d'enseignement

Après avoir montré dans l'argumentaire initial les problèmes des étudiants concernant le symbolisme, nous mentionnons explicitement dans la progression l'enseignement de différents symbolismes utilisés en chimie organique : schématisation d'une synthèse organique (partie 2), symbolisme de la flèche courbe (partie 3), schématisation d'une rétrosynthèse (partie 4).

Nous pensons que les enseignants pourraient alors considérer davantage le symbolisme comme un objet d'enseignement et mieux l'intégrer à leur cours (Agrebi, 2004). Ainsi les étudiants devraient montrer moins de difficultés à ce sujet.

4. Deux exemples de séquences introduisant la synthèse organique

Nous proposons dans l'artefact deux exemples de séquences introduisant la notion de synthèse organique (artefact, pp.20-42). Ces deux séquences sont associées à la partie 2 de notre progression, qui s'intitule : « Qu'est-ce qu'une stratégie de synthèse organique ? ».

[1] Nous utilisons ici la terminologie européenne inscrite dans les orientations de l'Union Européenne en matière d'éducation et de formation. Les compétences sont conçues comme une combinaison de connaissances, de capacités et d'attitudes à mettre en œuvre dans des situations concrètes.

Nous espérons que ce type de séquence peut permettre aux étudiants d'avoir une représentation positive et actuelle de la chimie organique, à travers l'une de ses principales finalités : la synthèse d'espèces chimiques organiques. Pour ces raisons nous pensons que les enseignants pourraient trouver eux-aussi ces deux séquences intéressantes, et en outre construire des PCK sur l'enseignement de la synthèse organique dès la première année. Nous apportons des informations complémentaires à destination des enseignants grâce à des bulles.

Nous détaillons les deux exemples ci-dessous.

4.1. Exemple de séquence n°1 – Une synthèse de la juvabione

4.1.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence

La première page de la séquence (artefact, p.20) présente ses principaux objectifs, les prérequis et un plan décliné en trois tâches principales et sous-tâches.

Les principaux objectifs de cette séquence sont de comprendre ce qu'est une synthèse organique, savoir utiliser le symbolisme de la synthèse organique, savoir reconnaître des aménagements fonctionnels et structurels et s'approprier des critères permettant de choisir la meilleure proposition de stratégie de synthèse organique. Nous avons volontairement décliné les objectifs davantage sous forme de capacités et de compétences que de connaissances seules[1] afin de montrer que l'apprentissage de la chimie organique ne se résume pas à une mémorisation de connaissances.

Nous choisissons d'atteindre ces objectifs d'apprentissages via trois principales tâches qui sont de schématiser une synthèse organique, analyser la nature des aménagements et choisir la meilleure stratégie de synthèse organique. Nous en donnons le détail dans ce qui suit.

4.1.2. Description des tâches principales et des documents associés

La première tâche vise à schématiser une synthèse organique. Les termes de « synthèse organique » et « stratégie de synthèse organique » sont préalablement définis. Nous

[1] Comme déjà mentionné précédemment, nous utilisons ici la terminologie européenne inscrite dans les orientations de l'Union Européenne en matière d'éducation et de formation. Les compétences sont conçues comme une combinaison de connaissances, de capacités et d'attitudes à mettre en œuvre dans des situations concrètes.

fournissons aussi explicitement un code de schématisation d'une synthèse organique (document 2, p.31 de l'artefact), dans laquelle nous introduisons la notion d'espèce chimique principale (c'est-à-dire celle qui nous intéresse dans la synthèse). Une bulle permet d'expliquer aux enseignants pourquoi nous inventons les termes de « réactif principal » / « réactif secondaire » plutôt que d'utiliser les termes de « substrat »/ « réactifs » : ces derniers renforcent la conception des étudiants selon laquelle un réactif agirait sur un substrat sans modification du réactif lui-même. L'appellation que nous préconisons rétablit l'équilibre en considérant que ce sont tous des réactifs, mais que l'un d'entre eux est notre objet d'étude (réactif principal). Nous demandons aux étudiants de schématiser une synthèse organique de la juvabione à partir d'extraits d'un article de recherche (Ficini *et al.*, 1974) traduits en français par nos soins et intégrés au document 1 (artefact, p.30). D'autres bulles permettent d'expliquer aux enseignants notre choix de montrer que la science est issue d'une construction humaine dans des contextes particuliers, et que pour lutter contre les difficultés des étudiants avec le symbolisme il est nécessaire de travailler ce dernier par une tâche qui lui soit dédiée.

Le choix de la synthèse de la juvabione provient en particulier du fait qu'elle est décrite dans un ouvrage que les enseignants de chimie organique connaissent bien : celui de Carey & Sundberg (1997). Si nous pensons que l'idée d'introduire de la chimie organique telle qu'elle se fait devrait intéresser les enseignants, il est possible qu'ils soient effrayés en envisageant l'utilisation de molécules « trop complexes » pour les étudiants. Nous attendons qu'ils se rendent compte que derrière l'apparente difficulté de la synthèse de la juvabione, les tâches proposées le sont moins car il ne s'agit pas ici de comprendre la synthèse au niveau des réactions et des mécanismes.

C'est ce que nous précisons aux enseignants à l'aide d'une bulle pour la tâche n°2. Dans cette tâche nous faisons analyser chaque étape de la synthèse de la juvabione en termes d'aménagements fonctionnels et d'aménagements structurels. Nous reprenons à notre compte ces notions existant dans des livres ou sections de livres traitant de la synthèse organique (par exemple Corey & Cheng, 1989 ; Carey & Sundberg, 1992 ; Laszlo, 1993 ; Sparfel, 1992). L'intérêt de ces notions est qu'elles peuvent être appliquées simplement à partir des formules des espèces chimiques en jeu sans avoir besoin de recourir aux mécanismes réactionnels. Ainsi les étudiants se familiarisent avec le matériau de base du chimiste organicien, à savoir les espèces chimiques et leurs transformations.

Nous pensons que le schéma de synthèse de la juvabione qui est fourni dans le document 3 (artefact, p.32) pourrait paraître fastidieux à analyser. Nous avons en effet choisi de

poursuivre la séquence avec l'exemple de la juvabione pris initialement. Si cette synthèse paraissait trop longue nous souhaiterions que les enseignants proposent une adaptation de la tâche : le travail d'analyse pourrait être réparti entre les étudiants, un extrait seulement de la synthèse de la juvabione ou une synthèse plus courte d'une autre molécule pourraient être donnés.

Enfin la tâche n°3 est l'occasion de fournir des critères opérationnels afin de choisir la meilleure stratégie de synthèse organique entre plusieurs possibilités. Nous utilisons les critères fournis par Sparfel (1992) : le rendement global d'une synthèse et la masse totale mise en œuvre. En considérant que la masse totale (de réactif principal) qu'on met en œuvre à chaque stade varie dans le même sens que les quantités de solvants, de réactifs secondaires ou d'énergie, ce critère permet une comparaison approximative mais assez simple du coût de plusieurs synthèses. En outre il permet de justifier certaines « règles » de conception de synthèses telles que le positionnement en début de synthèse d'une transformation au rendement faible, ou encore l'avantage d'une synthèse convergente par rapport à une synthèse linéaire.

Nous espérons ainsi que les enseignants comprendront qu'il est possible de faire réaliser des tâches assez simples en rapport avec la synthèse organique. Les enseignants pourraient ainsi construire des PCK sur l'enseignement de la synthèse organique dès la première année. En outre nous pensons que les enseignants verront l'intérêt d'utiliser ces critères pour valider facilement des propositions de synthèses organiques effectuées par les étudiants, sans avoir à se référer à des connaissances qu'ils n'ont pas sur leur validité expérimentale ou industrielle. Ce dernier problème était justement souligné par Hélène lors de son entretien (chapitre III-2). Ainsi les enseignants pourraient développer des PCK relatives à la gestion des phases de conclusion.

4.1.3. Évaluation finale de la séquence : deux synthèses du grandisol

Nous suggérons un exemple d'évaluation finale en accord avec les objectifs d'apprentissages de cette séquence. Les enseignants bénéficient alors de différents éclairages sur le savoir à enseigner dans cette séquence : les objectifs d'apprentissage, le détail des tâches proposées en classe et enfin ce qui est demandé aux étudiants lors de l'évaluation finale.

Le support de cette évaluation est constitué de deux synthèses du grandisol qu'ils doivent schématiser, décrire, analyser en termes d'aménagements puis comparer grâce à des calculs de rendements globaux.

4.2. Exemple de séquence n°2 – Conception de synthèses organiques simples

4.2.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence

La première page de la séquence (artefact, p.33) présente ses principaux objectifs, les prérequis et un plan décliné en trois tâches principales et leurs sous-tâches respectives.

Les principaux objectifs de cette séquence sont d'analyser un problème de conception de synthèse organique, utiliser une base de données (réactiothèque), utiliser les critères connus pour autoréguler la conception et connaître quelques principaux aménagements fonctionnels et structurels. Une fois encore nous avons volontairement diversifié la nature des objectifs d'apprentissages entre connaissances, capacités et compétences.

Les principales tâches seront de concevoir un protocole à partir d'un plan de synthèse succinct, reconstituer un plan de synthèse et concevoir des synthèses simples. Nous les détaillons ci-dessous.

4.2.2. Description des tâches principales et des documents associés (la réactiothèque)

La première tâche consiste à concevoir un protocole à partir du plan de synthèse succinct d'un précurseur du Patchoulol (Yamada *et al.*, 1979). Après avoir réinvesti les notions d'aménagements, les étudiants sont invités à utiliser une base de données afin de proposer des conditions réactionnelles les plus adaptées à la synthèse de la molécule cible selon le plan de synthèse indiqué au document 5 (tome 2, p.40). Ils doivent enfin déterminer le rendement global de la synthèse qu'ils ont détaillée à l'aide des rendements des transformations affichés dans la base de données.

Le calcul du rendement global donne un moyen simple de valider les propositions des étudiants. A ce critère nous ajoutons (dans une bulle) celui de la pertinence du choix de chaque étape réactionnelle par rapport aux molécules présentes dans le plan de synthèse. Les enseignants sont ainsi armés pour valider les propositions d'élèves sans avoir à se référer à une connaissance inaccessible à la classe (PCK de gestion des phases de conclusion). C'est

pourquoi en même temps que nous fournissons le corrigé proposé par Arnaud (1998), nous précisons que le but n'est pas que les étudiants retrouvent ce protocole originel, construit par les chercheurs, mais qu'ils se familiarisent avec l'utilisation de la base de données.

La base de données prend la forme d'un document papier, nommé « réactiothèque », qui est fourni aux étudiants. Le document 4 (artefact, pp.38-39) décrit le contenu de cette réactiothèque ainsi que ses intérêts dans l'enseignement de la chimie organique. La réactiothèque répertorie et classe (avec trois entrées différentes) un ensemble de transformations d'espèces chimiques. Chaque transformation est issue d'une publication d'une équipe de chercheurs. Sont alors donnés un schéma de synthèse sur un exemple précis, le rendement obtenu, la référence bibliographique et éventuellement des remarques. Les étudiants ont ainsi directement accès à un des aspects de l'activité du chimiste organicien contemporain. En outre l'étudiant qui utilise une transformation de la réactiothèque doit consciemment la sortir de son contexte initial afin de la transposer à d'autres espèces chimiques, d'autres situations expérimentales et d'autres problèmes de chimie organique. Cette décontextualisation-recontextualisation est donc laissée à la charge de l'étudiant qui en percevrait mieux les limites.

Malheureusement nous n'avons pas construit l'intégralité de cette réactiothèque et nous n'en fournissons que quelques extraits : d'une part ce travail nécessitait beaucoup trop de temps par rapport à celui dont nous disposions, d'autre part il nous fallait être sûr que l'utilisation en classe d'une telle ressource obtiendrait l'adhésion des enseignants. Nous mentionnons deux sites Internet qui représentent des bases de données accessibles facilement.

Deux des entrées de la réactiothèque se font via les groupes fonctionnels (transformés dans le sens direct ou préparés dans le sens rétrosynthétique), nous espérons ainsi inciter les enseignants à abandonner une structuration de leur cours par fonction puisque cette structuration est déjà contenue dans la réactiothèque. C'est d'ailleurs ce qu'Émilie disait lors de son entretien (chapitre III-2). Enfin nous précisons dans une bulle que la réactiothèque n'a pas vocation à être mémorisée en vue d'un examen ou d'un concours centré sur la restitution de réactions mémorisées. Elle est un support de travail pour le cours et l'enseignant est libre d'utiliser d'autres moyens pour la mémorisation de réactions génériques (roue des fonctions, fiches « résumé », bilans de fin de chapitre, etc.).

Comme nous l'indiquons aux enseignants (dans une bulle) tous les types d'exercice ou de problème peuvent être imaginés : avec ou sans produits de départ, avec ou sans les

conditions réactionnelles, avec un choix à faire parmi des étapes réactionnelles, etc. L'utilisation de la réactiothèque ouvre ainsi toute une gamme de possibles comme l'envisageait Bertrand (chapitre III-2). Les tâches n°2 et n°3 en sont des exemples. En manipulant les transformations de la réactiothèque les étudiants seront peu à peu amenés à repérer et à mémoriser celles qui permettent les principaux aménagements (fonctionnels et structurels) : le document 6 (artefact, pp.41-42) reproduit des extraits de Smith (1994) avec une roue des fonctions associée à une vingtaine de transformations ainsi que la liste des dix principales formations de liaisons carbone-carbone.

Nous pensons que les enseignants verront l'intérêt de faire travailler les étudiants avec une base de données telle que la réactiothèque. Cependant ils risquent de marquer une opposition en raison de la nature des examens et des concours qui incite à faire travailler la mémorisation de réactions génériques. Nous postulons que l'utilisation de la réactiothèque permet de diversifier les modalités de travail autour des réactions chimiques et donc offre un mode d'apprentissage complémentaire des réactions génériques. Mais ceci restera à prouver lors de recherches ultérieures concernant les étudiants.

Enfin nous pensons que tout comme la séquence n°1, la séquence n°2 permet de développer des PCK sur l'enseignement de la synthèse organique dès la première année.

4.2.3. Évaluation finale de la séquence : synthèse d'une napthoquinone

Comme pour la séquence n°1, nous suggérons un exemple d'évaluation finale permettant d'offrir un éclairage complémentaire sur le savoir à enseigner dans cette séquence.

Le support de cette évaluation est constitué du début de la synthèse d'une naphtoquinone proposée par Menting *et al.* (1983). L'usage de la réactiothèque est évidemment autorisé.

5. Deux exemples de séquences introduisant les mécanismes réactionnels

Nous proposons ensuite dans l'artefact deux exemples de séquences introduisant les fondements des mécanismes réactionnels (tome 2, pp.43-63). Ces deux séquences sont associées à la partie 3 de notre progression, qui s'intitule : « Que se passe-t-il pendant une réaction de chimie organique ? Notion de mécanisme réactionnel », et plus précisément à la deuxième moitié : « Comment expliquer ou prévoir une réaction de chimie organique ? »

Nous espérons que ce type de séquence peut permette aux étudiants d'avoir une représentation positive et actuelle de la chimie organique, en comprenant mieux la nature et la fonction des éléments théoriques et des modèles utilisés. Pour ces raisons nous pensons que les enseignants pourraient trouver eux-aussi ces deux séquences intéressantes, et en outre construire des PCK sur l'enseignement de la modélisation.

Nous détaillons les deux exemples ci-dessous.

5.1. Exemple de séquence n°3 – Un mécanisme réactionnel de l'hydrolyse basique des esters

5.1.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence

La première page de la séquence (artefact, p.43) présente les principaux objectifs de la séquence, les prérequis et un plan décliné en quatre tâches principales et sous-tâches.

Les principaux objectifs de cette séquence sont de savoir classer une transformation (parmi addition, élimination, transposition et substitution), comprendre ce qu'est un mécanisme réactionnel, décrire un mécanisme réactionnel en termes de rupture et formation de liaisons (nomenclature A/D), savoir choisir un mécanisme réactionnel valide, connaître le modèle donneur/accepteur de la réactivité chimique organique, comprendre et utiliser le symbolisme de la flèche courbe, connaître le critère du ΔpKa, et enfin connaître un mécanisme probable de l'hydrolyse basique des esters. Les objectifs sont ici aussi un mélange de connaissances et de capacités visant à construire certaines compétences du chimiste organicien.

Les tâches et sous-tâches sont organisées autour de quatre points : analyser la transformation de l'espèce chimique principale, décrire un mécanisme réactionnel donné en termes de dissociation et association, choisir le mécanisme le plus en accord avec les données expérimentales, interpréter et représenter la réactivité chimique organique.

5.1.2. Description des tâches principales et des documents associés

La première tâche consiste à faire réfléchir les étudiants sur ce qu'il se passe au niveau des liaisons de l'espèce chimique principale à chaque étape de la synthèse. Nous avons repris l'exemple de la synthèse de la juvabione (séquence n°1). Les étudiants doivent repérer les apparitions, disparitions ou modifications de liaisons au sein de l'espèce chimique principale. Ensuite ils doivent classer chaque transformation en addition, élimination,

substitution (échange) ou transposition sur la base de ces modifications de liaisons. Le document 7 (artefact, p.55) présente un algorithme de classement.

Nous avons sensiblement modifié ces définitions afin d'éviter un couplage trop fort entre classe de la transformation et groupe fonctionnel ou encore type de mécanisme. Par exemple une élimination ne donne pas lieu seulement à l'apparition d'un doublet π comme lors de l'obtention d'un alcène par déshydrohalogénation d'un dérivé halogéné ou déshydration d'un alcool, mais plus généralement l'apparition d'un doublet liant (σ ou π). Ceci permet d'inclure par exemple dans la classe des éliminations une cyclisation (monomoléculaire) avec départ d'une « petite » molécule (H_2O, HCl). Afin de rendre ces définitions plus opérationnelles pour les étudiants nous avons défini aussi le « site réactif » de l'espèce chimique principale comme l'atome ou le groupe d'atomes appartenant au réactif principal et au produit principal, et subissant des apparitions, disparitions ou modifications de liaisons.

Avec cette classification fondée sur l'étude des modifications de l'espèce chimique principale nous voulons dissocier la transformation indiquée par le schéma de synthèse, du mécanisme réactionnel. Comme nous le précisons aux enseignants (dans une bulle) l'IUPAC souligne en effet les ambiguïtés portées par la nomenclature d'Ingold (S_N2, S_N1, etc.) : par exemple cette nomenclature mélange un aspect phénoménologique (addition, élimination, etc.) avec l'aspect moléculaire et mécanistique (molécularité, caractéristiques électroniques). C'est pourquoi l'IUPAC propose de décrire les mécanismes réactionnels seulement par rapport aux formations et ruptures de liaisons à chaque étape du mécanisme réactionnel (nomenclature A/D). Nous avons jugé utile de modifier cette dernière nomenclature en la limitant aux liaisons de l'espèce chimique principale. Nous pensons qu'il est important de bien définir l'espèce chimique principale comme objet d'étude, afin d'éviter d'autres ambiguïtés : par exemple lorsqu'on privilégie soit le réactif nucléophile soit le réactif électrophile en nommant un mécanisme ionique où interagissent ces deux réactifs (addition nucléophile ou addition électrophile ?). Enfin l'utilisation du terme « échange » (emprunté à W. Theilheimer in Drouin, 1999) pourrait supplanter « substitution » et améliorer la distinction entre le niveau du schéma de synthèse et celui du mécanisme réactionnel. Nous donnons volontairement comme exemple de substitution (ou échange) l'acylation d'un acide carboxylique car il obéit à un mécanisme d'addition-élimination (et pas de substitution). Nous avions remarqué l'étonnement de quelques enseignants lors des entretiens (partie III de notre thèse) en voyant dans un de nos supports le terme de substitution appliqué à la fonction acide carboxylique.

Nous souhaitons que les enseignants comprennent la nécessité de telles définitions plus opérationnelles, mais inversement il leur sera sans doute problématique d'utiliser des définitions qui ne correspondent pas totalement à celles habituellement utilisées par la communauté des enseignants de chimie organique.

Remarquons que nous aurions pu aussi utiliser la classification des transformations selon les variations du degré d'oxydation de l'espèce chimique principale (transformations d'oxydation, de réduction ou isohypsiques). Une telle classification offre un éclairage différent sur les transformations étudiées. Nous l'avons écartée pour ne pas alourdir le contenu à enseigner, et aussi car cette classification permettait moins le travail sur les apparitions, disparitions et modifications de liaisons, qui nous semble utile pour asseoir la suite de l'apprentissage des mécanismes réactionnels.

Pour la tâche n°2, nous proposons 4 mécanismes possibles de la réaction d'hydrolyse basique d'un ester (document 8, tome 2, page 56). Après une série de questions au niveau du schéma de synthèse (aménagement, ce qu'il advient des liaisons, classe de la transformation) les étudiants doivent décrire chaque mécanisme avec la nomenclature A/D. Les étudiants doivent à nouveau étudier ce qu'il advient des liaisons de l'espèce chimique principale mais cette pour chaque étape du mécanisme réactionnel. Le document 8 n'utilise pas encore le symbolisme des flèches courbes : nous le justifierons dans la suite de ce chapitre.

La tâche n°3 est fondée sur les études des documents 9 et 10 (artefact, pp.57-58) décrivant des expériences historiques de marquage isotopique qui ont permis de justifier un mécanisme réactionnel de l'hydrolyse basique des esters. Le document 9 décrit le protocole et les résultats obtenus lors du marquage isotopique de l'oxygène de l'eau, afin de permettre de déterminer laquelle des deux liaisons simples C-O de l'ester est coupée lors de la réaction. Une simple mesure de la densité de l'eau obtenue par déshydratation de l'alcool final permet de conclure sur la localisation de l'oxygène marqué après la transformation. Le document 10 décrit une expérience de marquage de l'oxygène du groupement C=O de l'ester. Il s'agit de l'expérience historique ayant permis de justifier la présence d'un intermédiaire tétraédrique dans le mécanisme réactionnel. Cette deuxième expérience est plus délicate à comprendre car elle nécessite d'invoquer des équilibres chimiques (en particulier acido-basiques) qui auront été abordés précédemment dans notre progression.

Nous avons délibérément évité les expériences de cinétique qui auraient nécessité de rajouter des éléments théoriques de nature différente à l'introduction des mécanismes

réactionnels. Nous avons cherché en vain des cas simples de détection de l'intermédiaire réactionnel tétraédrique, ce qui nous aurait évité d'utiliser l'expérience rapportée dans le document 10. Si cette dernière expérience pose effectivement trop de problèmes aux enseignants et qu'il n'est pas possible de la transposer plus efficacement pour l'enseignement, il nous faudra alors poursuivre la recherche d'un exemple de détection simple de l'intermédiaire. Nous espérons qu'à travers cette tâche les étudiants comprendront mieux le statut et la fonction des modèles, notamment leur articulation avec des résultats expérimentaux qu'ils interprètent. Quant aux enseignants cette tâche devrait leur permettre de poursuivre le développement de PCK sur l'enseignement de la modélisation.

Enfin la tâche n°4 est l'occasion d'interpréter la réactivité en introduisant la notion de donneur/accepteur (Scudder, 1992). L'intérêt de cette notion est qu'elle est uniquement fondée sur des aspects moléculaires en faisant abstraction de la distinction entre thermodynamique et cinétique incluse dans les notions respectivement de base/acide de Lewis et nucléophile/électrophile. Cette nuance peut être dévoilée lors de la partie 5 sur les aspects cinétiques et thermodynamiques en réactivité chimique. En outre la terminologie donneur/accepteur est utilisée en rétrosynthèse (synthons donneurs et accepteurs) ce qui permet de préparer des apprentissages de la partie 4 de notre progression. Nous associons à cette notion structurelle de donneur/accepteur un modèle thermodynamique complémentaire et opérationnel : le critère du ΔpKa. Dans une bulle nous expliquons l'origine de ce critère, à savoir son utilisation dans un logiciel d'aide à la conception de synthèses organiques (Salatin & Jorgensen, 1980) puis son adaptation par quelques enseignants américains (Scudder, 1992 ; Straumanis, 2008). Nous précisons aux enseignants qu'il s'agit certes d'une approximation thermodynamique mais que ce critère peut rendre de bons services lorsqu'on débute en chimie organique, sans avoir à introduire de notions thermodynamiques plus complexes.

L'introduction du symbolisme des flèches est volontairement réalisée ici, en même temps que l'introduction de la notion donneur/accepteur. Nous pensons que les enseignants auront un peu de mal à envisager l'introduction si tardive du jeu de flèches courbes, puisqu'il s'agit d'un symbolisme qu'ils ont totalement intégré et qui va de soi pour eux (Agrebi, 2004). Mais nous espérons qu'ils comprendront que ce jeu de flèches n'est pas un outil incontournable et suffisant pour travailler les mécanismes réactionnels, et qu'en outre sa signification doit être construite dans l'intérêt des étudiants.

Pour conclure il nous faut justifier le choix de la réaction d'hydrolyse basique des esters pour introduire les mécanismes réactionnels. Tout d'abord cette réaction est connue des étudiants depuis la classe de terminale. Nous pensons ensuite provoquer la surprise chez les enseignants pour qui les esters ne peuvent pas servir à introduire les mécanismes réactionnels puisque les dérivés d'acide ne sont traités que bien plus tard dans la structuration par fonction. Nous cherchons donc à déstabiliser ce que nous pensons être une PCK ou une composante du genre professionnel des enseignants, ces derniers associant l'introduction des mécanismes réactionnels aux premières fonctions (alcènes, dérivés halogénés) de la structuration par fonctions. Nous avons toutefois évité des mécanismes un peu plus complexes tels que ceux de l'estérification ou de l'acétalisation car ils incluent des notions d'activation par catalyse acide ; nous réservons cette difficulté supplémentaire à la partie 5 de notre progression abordant les aspects cinétiques et thermodynamiques des réactions. Le mécanisme d'addition-élimination de l'hydrolyse basique des esters est commun à plusieurs autres réactions, mais permet aussi d'envisager des mécanismes d'addition où l'élimination d'un groupe partant est interdite par le critère du ΔpKa : c'est le cas de réactions avec les dérivés carbonylés par exemple. Cette séquence permet donc de construire un mécanisme qui constitue ensuite une connaissance supplémentaire utile pour permettre des prévisions de réactions chimiques par les étudiants. C'est l'objet de l'exemple de séquence n°4.

5.1.3. Évaluation finale de la séquence : mécanisme d'hydrolyse d'une lactone

Comme dans les deux séquences précédentes nous proposons ici un exemple d'évaluation finale afin de préciser aux enseignants les connaissances, capacités et compétences attendues chez les étudiants.

Le support de cette évaluation est l'étude du mécanisme d'hydrolyse d'une lactone (ester cyclique). Les étudiants doivent donc restituer le schéma de synthèse et le mécanisme d'une hydrolyse basique d'un ester, réaliser une description du mécanisme avec la nomenclature A/D, proposer un mécanisme réactionnel d'hydrolyse basique de la lactone avant d'étudier des résultats expérimentaux permettant de vérifier la validité du mécanisme prévu par les étudiants.

5.2. Exemples de séquence n°4 – Prévision de quelques réactions chimiques

5.2.1. Objectifs, prérequis et plan de la séquence

La première page du descriptif de la séquence (artefact, p.59) présente ses principaux objectifs, les prérequis et un plan décliné en quatre tâches principales et sous-tâches.

Les principaux objectifs de cette séquence sont de savoir prévoir des réactions chimiques, savoir utiliser des critères permettant de réguler cette prévision, connaître les mécanismes probables de quelques réactions usuelles en chimie organique. A travers ce dernier objectif nous retrouvons explicitement des éléments du savoir à enseigner actuel. Nous leur adjoignons des capacités et des compétences autour de la prévision de réactions et l'autorégulation de ces prévisions.

Les tâches et sous-tâches que nous proposons sont organisées autour de quatre points : prévoir une réaction chimique proche d'une réaction connue, vérifier la cohérence d'une prévision de réaction chimique, compléter une prévision de réaction chimique, tout ceci pour finalement parvenir à prévoir une réaction chimique.

5.2.2. Description des tâches principales

La tâche n°1 consiste à prévoir des réactions chimiques aux mécanismes proches de celui de l'hydrolyse basique des esters. Nous proposons aux étudiants de prévoir le mécanisme et les produits obtenus pour différentes réactions (aminolyse d'un ester, hydrolyse de dérivés d'acide ou réaction entre l'éthanal et la soude). Le chemin est balisé : les étudiants doivent partir du mécanisme qu'ils connaissent, celui de l'hydrolyse basique des esters, afin de proposer d'autres mécanismes et ils doivent vérifier la validité de leurs prévisions en utilisant les interactions donneur/accepteur, les flèches courbes, la nomenclature A/D et le critère du ΔpKa. Ensuite seulement ils peuvent vérifier que les produits qu'ils obtiennent correspondent à ce qui est indiqué dans la réactiothèque ou toute autre source d'information (Internet, livre). Enfin ils doivent vérifier la possibilité de la synthèse d'un anhydride à partir d'un dérivé d'acide et d'un ion carboxylate.

La tâche n°2 concerne l'hydrolyse basique d'un amide. Un mécanisme analogue à celui du mécanisme d'hydrolyse basique d'un ester est proposé aux étudiants qui doivent le tester à l'aide des critères à leur disposition (donneur/accepteur, faisabilité de la dernière étape acido-basique, ΔpKa). Le mécanisme doit être alors invalidé car il ne vérifie pas le critère du ΔpKa. Un mécanisme légèrement modifié leur est proposé et celui-ci vérifie l'ensemble des critères. Ainsi les étudiants peuvent comprendre qu'un mécanisme réactionnel est un modèle qui ne peut pas être transposé directement à toute réaction, qu'il peut être modifié voire abandonné. C'est l'occasion de continuer le développement chez les enseignants de

PCK sur l'enseignement de la modélisation à travers une bulle donnant quelques exemples : explication, prévision, choix d'un modèle parmi plusieurs, élargissement du domaine de validité d'un modèle, abandon d'un modèle ou son amélioration.

Lest tâches n°3 et n°4 ont pour but de compléter une prévision de réaction entre un organolithien et un dérivé carbonylé, entre un organomagnésien et un ester ou prévoir un mécanisme réactionnel pour d'autres réactions (réaction parasite de Wurtz lors de la synthèse d'un organomagnésien, réaction entre un époxyde et un organomagnésien). Une nouvelle fois les étudiants utilisent les connaissances et critères construits dans l'exemple de séquence n°3.

Nous précisons aux enseignants grâce à une bulle que les interactions donneur/accepteur et le critère du ΔpKa ne permettent pas à eux seuls des prévisions de réactions chimiques. Ils ne constituent pas des algorithmes complets et infaillibles. C'est pour cela que pour guider la prévision sont nécessaire d'autres connaissances telles que la connaissance du mécanisme d'hydrolyse basique d'un ester ou la possibilité d'aller chercher ce qu'il manque grâce à une expérimentation au laboratoire (ou dans la réactiothèque). Nous espérons que les enseignants comprendront que la notion de nucléophile/électrophile sur laquelle ils se concentrent lorsqu'ils font chercher des mécanismes aux étudiants (voir chapitre III-2) est insuffisante pour arriver au bout de la tâche à moins d'avoir mémorisé antérieurement un certain nombre de transformations et de mécanismes réactionnels (chapitre II-2).

5.2.3. Évaluation finale de la séquence

Nous proposons un exemple d'évaluation finale des apprentissages visés par cette séquence.

Il s'agit de déterminer le mécanisme d'hydrolyse basique d'un chlorure d'acyle, mécanisme proche de celui d'hydrolyse basique d'un ester, et de prévoir quelques autres réactions en précisant les interactions donneur/accepteur et le critère du ΔpKa (ion alcynure et dérivé halogéné, hydrolyse basique d'un époxyde, organomagnésien et dioxyde de carbone). L'usage de la réactiothèque est interdit mais celui d'une table de pKa est autorisé.

6. Des ressources bibliographiques en annexe

6.1. Les références bibliographiques

Comme pour tout document écrit, les références bibliographiques doivent permettre aux enseignants de retrouver une référence s'ils le souhaitent. En outre cela apporte du poids et du sérieux au contenu du document.

6.2. Des articles de chimie organique (synthèses organiques, mécanismes)

Nous avons choisi de fournir in extenso les articles de recherche en chimie organique (synthèse de molécules, détermination de mécanismes réactionnels) sur lesquels s'appuie l'artefact. Les enseignants n'ont pas forcément accès facilement à cette littérature (ville isolée, utilisation de la bibliothèque universitaire, articles anciens nécessitant un prêt entre bibliothèques, etc.). Nous espérons ainsi permettre aux enseignants de retourner si besoin à la littérature originelle et d'aborder autrement la transposition de ces informations en tâches et documents pour les étudiants.

6.3. Deux articles sur l'enseignement de la synthèse organique et des mécanismes réactionnels

Nous joignons aussi deux articles particulièrement intéressants sur l'enseignement de la synthèse organique (Smith, 1990) et des mécanismes réactionnels (Scudder, 1997). Le premier propose une démarche quasi algorithmique de rétrosynthèse, et une vision intéressante de la synthèse organique (roue des fonctions, etc.). Le second prône le passage d'un enseignement de la chimie organique fondé sur la mémorisation d'une base de données à un enseignement « expert » fondé sur un nombre limité de connaissances de contrôle. Nous espérons ainsi permettre aux enseignants de retourner si besoin à des articles abordant différemment l'enseignement de la chimie organique et réfléchir par eux-mêmes à d'autres voies qui leur seraient propres.

Chapitre IV-3

Résultats d'analyse de l'activité instrumentée des enseignants

Nous décrivons dans cette partie les principaux résultats du test de notre artefact initial auprès de 8 enseignants. Face à la quantité et à la diversité des informations obtenues à travers les quatre simulations de préparations de cours, nous sommes contraints ici de n'en présenter que les résultats les plus remarquables. Par un effet de présentation certains résultats sont affichés pour un binôme en particulier alors que des observations similaires ou complémentaires ont été faites pour d'autres binômes : nous le préciserons le cas échéant.

1. La genèse instrumentale pour le binôme Cathy & Noël (CPGE BCPST)

Cathy enseigne la physique-chimie depuis 8 ans en 1ère année de CPGE BCPST. Quant à Noël il enseigne depuis 5 ans la physique-chimie en 2ème année de CPGE BCPST dans un autre établissement.

Nous présentons ci-dessous ce qu'il ressort d'abord du questionnaire « premières impressions », puis nous présentons quelques résultats saillants de la genèse instrumentale réalisée lors de la simulation de préparation de cours.

1.1. Les « premières impressions »

1.1.1. Cathy : trop difficile tant sur le fond que sur la forme

Cathy a rempli rapidement le questionnaire. Elle semble avoir eu du mal avec l'artefact. Son impression générale est que le document est difficile à comprendre, les concepts sont difficiles et les documents difficilement lisibles pour des étudiants qui débutent en chimie

organique. Elle souligne en particulier la *« difficulté des documents pour comprendre le mécanisme d'hydrolyse »*. Malgré tout il lui semble intéressant de *« savoir repérer des transformations ».*

En somme Cathy se montre plutôt réfractaire et il s'agira ensuite pour nous de savoir un peu mieux pourquoi.

1.1.2. Noël : une argumentation convaincante et poussant à la réflexion sur cet enseignement

Quant à Noël son impression générale est que l' *« introduction du travail [est] convaincante et pousse à la réflexion sur l'enseignement de la chimie organique »*. Il est favorable au *« lien plus important avec l'industrie et la réalité »*, le *« souci de représenter les transformations sur des exemples réels »*. Pour lui l'intérêt de la séquence 3 concerne l'introduction du formalisme et l'élaboration des mécanismes réactionnels par les démarches scientifiques qui ont permis de les trouver sans qu'on doive les *« balancer »*. Cependant *« la progression [ne lui semble] pas très progressive »* avec le risque de noyer des caractéristiques de réactions au milieu des techniques utilisées. En outre les séquences 1 et 2 sur la synthèse organique et les exemples associés lui semblent difficiles pour des étudiants manquant de recul.

En conclusion Noël semble en accord avec nos préoccupations et nos arguments initiaux, il semble prêt pour la mise en place de démarches de modélisation en classe, mais certaines de nos propositions devront être retravaillées.

1.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation

En préliminaire Cathy décrit à Noël le test qu'elle a réalisé avec ses étudiants à partir des documents 1 et 2 de l'artefact. Il est intéressant de noter que même si Cathy s'est montrée réfractaire à travers ses « premières impressions » elle a réutilisé deux documents avec ses étudiants.

Ensuite les échanges entre Cathy et Noël portent sur la construction de la séquence demandée. Ils rencontrent des problèmes avec les expériences de marquage isotopique qu'ils jugent trop lourdes tant sur le fond que sur la forme. Ils passent un long moment à chercher d'autres expérimentations, en particulier de cinétique chimique, permettant de valider le mécanisme réactionnel de l'hydrolyse basique des esters. Finalement Cathy et Noël reviennent aux expériences de marquage et proposent un début de séquence qui

reprend les grandes lignes de la séquence de l'artefact : étude des modifications de liaisons dans une synthèse multi-étapes (qu'ils veulent simple et incluant une saponification), proposition de différents mécanismes (qu'ils modifient), résolution du problème du choix de la liaison C-O cassée par la première expérience de marquage isotopique, introduction du formalisme D/A et des flèches.

Nous revenons ci-dessous sur deux points en particulier : le test par Cathy et les difficultés liées aux marquages isotopiques.

1.2.1. Le détournement et le test en classe par Cathy d'une séquence de synthèse organique

La semaine précédant cette journée de travail avec les enseignants, Cathy a donné à ses étudiants un devoir à réaliser chez eux, fondé sur le document 1 (extraits d'une synthèse de la juvabione, artefact, p.30) et le document 2 (code de schématisation d'une synthèse organique, artefact, p.31). Nous avons récupéré le sujet et les copies. L'énoncé reprenait intégralement le document 1 mais il ne conservait du document 2 que le schéma de synthèse général (avec réactifs principal et secondaires, conditions expérimentales, etc.) ainsi qu'un des exemples de schéma de synthèse ; toutes les phrases expliquant la signification de ce symbolisme ont été supprimées. Il était demandé de schématiser la succession de réactions, donner si possible à chaque fois le type de réaction ou de mécanisme, préciser les réactifs nécessaires à la formation du tosylate *8b* à partir de *8a*, imaginer un mécanisme réactionnel pour le passage de *7a* à *7*b, faire la liste des solvants, et prévoir la couleur de la juvabione.

Dans l'extrait ci-dessous Cathy fait un compte-rendu du test.

> *C- « En fait, je leur ai donné ça. »*
> *N- « Oui. »*
> *C- « Et ils me l'ont fait. En fait, il y en a qui me l'ont fait, bon c'était le dernier jour, il y en a plein qui ne me l'ont pas rendu. Et quand je leur ai demandé: "Pourquoi vous ne me l'avez pas rendu ?". Ils m'ont dit : "J'ai rien compris.". »*
> *N- « Mais pourtant c'était une introduction dans le principe ? »*
> *C- « Non mais ils n'ont rien compris, le français. Enfin, je ne sais pas, c'est compliqué. »*
> *N- « Oui, alors les phrases en fait, quand tu lis elles demandent, déjà, d'avoir, en fait, une compréhension du... »*
> *C- « Enfin, moi, mes élèves ils avaient quasiment vu toutes les réactions. Et y a la moitié des élèves... après c'était le dernier jour... Je n'ai pas trop insisté. Je leur ai dit : "Vous me donnez, ça sera rendu et tout. Je vous le relève, et tout". Du coup, j'en ai vingt au lieu d'en avoir quarante. Mais, je pense que... je l'ai un peu lu en diagonale, mais, ceux qui me l'ont fait, ils l'ont bien fait et c'était dans l'esprit. Il y en a plein qui ne l'ont pas fait, parce qu'ils ont été... enfin c'est super compliqué. »*
>
> *Cathy et Noël (annexe, C2-5 / N3-5)*

Ainsi la moitié des étudiants a rendu une copie et ce qui a été fait semble bien fait, l'autre moitié n'a rien rendu. Les interprétations de Cathy sont qu'il s'agissait là du dernier cours de l'année et surtout que le texte est compliqué à comprendre. Cependant *« ceux qui l'ont fait, [ont été] motivés de bosser sur une vraie publi, par rapport à un problème de concours.* » (C8). Il apparaît pendant la simulation que dans l'esprit de Cathy les questions posées dans le devoir sont les mêmes que celles de l'artefact ; en réalité seule la première question sur la schématisation est la même.

Les résultats de ce test sont à discuter avec précautions puisque nous n'avons pas eu l'occasion de voir travailler les étudiants ou de les interroger. En parcourant rapidement les copies nous sommes du même avis que Cathy sur la qualité de ce qui a été rendu. Cependant nous apportons d'autres éléments d'interprétation du rejet par la moitié de la classe, hormis le fait que ce travail fut donné la dernière semaine de cours et que le texte soit peut-être difficile à lire : *« parce que les phrases […] sont compliquées, entre les solvants et tout »* (C82). Nous pensons que les questions ajoutées sur les mécanismes réactionnels et les types de réactions, la restitution d'une réaction de formation d'un tosylate, ou le repérage des solvants ont rendu la tâche plus difficile qu'elle ne l'était initialement dans l'artefact. Nous sommes effectivement d'avis que la publication est compliquée si on cherche à en comprendre le détail mécanistique, au lieu de la simple schématisation de la synthèse que nous proposions initialement. En outre il se pourrait que la réduction du code de schématisation à deux schémas de synthèse sans explication ait augmenté la difficulté de ce travail. Nous trouvons intéressant ce détournement de deux documents de l'artefact par Cathy : travail de fin d'année au lieu d'un support pour un cours introductif, travail hors de la classe au lieu d'un travail en classe encadré par l'enseignante, ajout de questions sur les mécanismes et les solvants, etc. Ceci soulève pour nous plusieurs interrogations.

Les enseignants voient-ils les documents fournis comme autant de supports à une activité d'enseignement-apprentissage en classe, ou pensent-ils que les documents se suffisent à eux-mêmes sans nécessiter l'intervention de l'enseignant ? Nous avons fait le choix de ne pas détailler l'activité pédagogique des enseignants en classe, mais peut-être serait-il nécessaire de présenter explicitement le déroulement de la séquence avec en parallèle les tâches dévolues aux étudiants et celles de l'enseignant.

L'enseignement de la chimie organique vise-t-il principalement la compréhension mécanistique ? Les documents 1 et 2 sont issus d'une séquence ayant pour objectifs des apprentissages de synthèse organique mais Cathy saisit l'occasion de partir d'un support jugé intéressant (une publication de recherche) pour interroger ses étudiants sur les mécanismes réactionnels. Nous nous demandons donc s'il ne s'agit pas ici de manifestations de PCK qui associeraient systématiquement l'étude des transformations des espèces chimiques organiques à leur interprétation mécanistique. Par conséquent l'évaluation de la difficulté du travail demandé aux élèves ne se fonderait pas sur les tâches proposées mais sur la difficulté mécanistique sous-jacente de la synthèse multi-étapes choisie.

Notons enfin que Cathy dit elle-même qu'elle n'a *« pas la culture »* (C25) et qu'elle n'est *« pas du tout une chimiste organicienne »* (C25). Ainsi nous nous demandons dans quelle mesure les difficultés qu'elle éprouve personnellement vis-à-vis de l'artefact et de la chimie organique sont attribuées à ses étudiants lorsqu'elle parle de leurs difficultés dans les extraits précédents.

1.2.2. Les problèmes liés aux expériences de marquage isotopique

Cathy et Noël ont rencontré des problèmes avec les expériences de marquage isotopique et les documents associés. Il leur semble lourd de devoir introduire des techniques supplémentaires (qui ne sont pas à leur programme de chimie) pour déterminer le mécanisme : marquage isotopique et mesure de densité par picnométrie, spectrométrie de masse donnant la proportion massique entre ester marqué ou non marqué.

La première expérience de marquage (document 9, artefact, p.57) visait le choix de la liaison rompue entre les deux liaisons C-O de l'ester (rupture acyle ou rupture alkyle). Cathy est gênée par le picnomètre qu'elle ne connaît pas. Le tableau de résultats de la publication originelle pose des problèmes de compréhension : significations des écarts de densité et des incertitudes de mesure. En outre nous avions omis de préciser que deux des cinq expériences étaient des expériences témoin sans marquage isotopique.

> *C- « Moi je n'ai rien compris là. Pourquoi c'est zéro ? Pourquoi c'est +330 ? »*
> *N- « Alors le tableau-là c'est hyper compliqué à comprendre. »*
>
> *Cathy et Noël (C209/ N215)*

La deuxième expérience de marquage (document 10, tome 2, p.58) visait à valider l'existence d'un intermédiaire réactionnel tétravalent. Elle apparaît très compliquée, comme nous le supposions au moment de la conception de l'artefact.

> *C- « Pareil, celui-là est compliqué non ? »*
> *N- « Ah oui, mais celui-là je n'ai même pas cherché à comprendre. Quand j'ai commencé à lire le truc il y avait trop de mots, trop de... Je n'ai écrit aucune équation. Cela me paraissait hyper compliqué aussi. Alors que la phrase... finalement ça c'est intéressant. Alors, ils n'ont obtenu que la quantité d'ester... Je croyais que, en fait, c'était ça qui était réparti, finalement... »*
> *C- « (lecture à voix basse) C'est-à-dire qu'il y a des équilibres en fait. Non ? »*
>
> *Cathy et Noël (annexe, C27-28 / N28)*

Cathy et Noël tentent alors de détourner ces problèmes en cherchant d'autres résultats expérimentaux dans d'autres sources (livres et un sujet de concours sur Internet), et en particulier en essayant d'exprimer les lois cinétiques pour les différents mécanismes proposés. Finalement voyant que cela n'aboutit pas, ils sont contraints de revenir aux expériences de marquage isotopique proposées.

> *N- « Oui. Oui donc là on n'a pas le choix de présenter un truc comme ce qu'il faisait avec des isotopes… »*
> *C- « C'est-à-dire tu… ? »*
> *N- « Et bien moi je cherche, dans mon idée je me disais : est-ce qu'on ne peut pas en fait contourner le problème des isotopes… »*
> *C- « Hmm. Ah oui d'accord. »*
> *N- « …en n'utilisant que des lois cinétiques. Mais apparemment non. »*
> *C- « Mais peut-être qu'on peut utiliser les isotopes mais de façon plus simple parce que déjà dans la façon dont c'est dit c'est compliqué en fait. Parce qu'il a voulu se rattacher finalement à… »*
> *N- « Une publi. »*
> *C- « Des mesures en fait. Le problème c'est exploiter les erreurs mesurées. (inaudible) »*
> *N- « Hmm. »*
> *C- « Et en fait ce qui est important c'est ça. On peut leur donner ça, le résultat de la publi. »*
> *[…]*
> *C- « Ca c'est super compliqué sincèrement. »*
> *N- « Oui voilà, tu n'as pas besoin de le mettre. »*
> *C- « Oui le protocole expérimental pour faire l'ester marqué on n'en a pas besoin quoi. »*
>
> *Cathy et Noël (annexe, C340-344, 346-347 / N369-373, 376)*

D'autres échanges avec eux confirment qu'il est nécessaire de transformer les documents, de les élaguer et de les simplifier. En effet trop d'informations et de résultats expérimentaux secondaires parasitent l'objectif principal de la validation de mécanismes réactionnels.

Gaëlle et Hélène ont aussi des problèmes avec les expériences de marquage isotopique qui leur semblent difficiles. Pour la première expérience nous retrouvons les mêmes problèmes concernant la compréhension du tableau de résultats, avec le souci en plus de la langue (anglais) pour Gaëlle. Gaëlle et Hélène tentent aussi de contourner le problème en cherchant d'autres sources (Internet) et d'autres résultats plus simples sur le marquage isotopique. Finalement elles reviennent aussi vers les expériences de marquage de l'artefact en opérant des transformations identiques à celles de Cathy et Noël (élagage des informations secondaires, transformation du tableau de résultats du document 9).

Nous souscrivons totalement aux critiques et propositions faites par ces deux binômes qui ont conduit à une transformation du document 9 (artefact, p.57) et l'amélioration de son utilisation en classe. Quant à l'expérience décrite au document 10 (artefact, p.58) nos observations ici confirment les difficultés que nous avions envisagées (chapitre IV-2). Son interprétation est en elle-même plutôt compliquée, et le document que nous proposions est sans doute lui aussi trop difficile à appréhender sur la forme. Le plus simple serait certainement de trouver une preuve expérimentale de l'existence de l'intermédiaire réactionnel à moins de mettre en place une autre articulation entre l'étude de l'addition nucléophile et l'application du critère du ΔpKa justifiant que la réaction se poursuit par une élimination dans certains autres cas. Cela aurait l'avantage de moins perturber les enseignants puisqu'usuellement les additions nucléophiles sont traitées avant les additions-éliminations. En outre à travers les simulations de deux binômes nous retrouvons une adaptation de la séquence n°3 visant à placer l'étude de l'addition nucléophile avant celle de l'addition-élimination (Gaëlle & Hélène, Muriel & Franck).

2. La genèse instrumentale pour le binôme Danielle et Kristian (Université)

Danielle et Kristian enseignent la chimie organique depuis plusieurs années à l'Université. S'ils ont eu l'occasion d'enseigner à bac+1 et bac+2 il y a plusieurs années, leurs enseignements s'adressent actuellement plutôt à des étudiants en fin de licence, master et école d'ingénieur.

Nous présentons ci-dessous les éléments de réponse de Danielle et Kristian au questionnaire « premières impressions », puis nous décrivons quelques aspects remarquables de leur simulation de préparation de cours.

2.1. Les « premières impressions »

Les réponses des deux enseignants au questionnaire « premières impressions » sont synthétisées ci-dessous.

2.1.1. Danielle : une approche intéressante mais peu réaliste

Globalement Danielle trouve l'artefact *« intéressant »*, *« agréable à lire »*, *« même si [elle] aurai[t] préféré ne pas avoir les réponses sous les yeux à l'intérieur des séquences pour réfléchir [elle]-même à la difficulté »*. Nous trouvons cette dernière remarque intéressante et il faudra effectivement en tenir compte lors de la poursuite de la conception de l'artefact.

Danielle apprécie en particulier le *« changement de méthode »*, l'utilisation des rendements, et le *« rapprochement des préoccupations contemporaines »*. Cependant l'approche lui pose beaucoup de problèmes : absence de *« chiffrage horaire »*, pas d'indication sur le public visé et *« les prérequis […] pas toujours bien évalués »*, une méthode *« chronophage »*, qui *« ressemble à la méthode globale »*, trop difficile dans l'ensemble pour un niveau bac+2 et donc *« peu réaliste »*. Au final les questions qu'elle se pose concernent le public, le nombre d'heures dont elle dispose, et s'il est possible de *« trouver des exemples plus simples »*.

En conclusion il nous apparaît que si Danielle est favorable à l'idée d'enseigner la chimie organique contemporaine, elle n'adhère pas vraiment aux propositions décrites dans l'artefact.

Notons que nous avions prévu initialement d'indiquer la durée de chaque partie de la progression et de chaque séquence, mais cela a ensuite disparu : la progression proposée n'est qu'un cadre dont l'application différera selon les volumes horaires disponibles dans chaque formation (STS, CPGE, Université) ; quant à la durée des séquences nous n'avons pas précisé tous les aspects pédagogiques de leur mise en œuvre, ce qui rend difficile un tel chiffrage. Cependant nous pensons qu'il serait pertinent de l'envisager dans le nouvel artefact.

2.1.2. Kristian : une approche intéressante des concepts via la synthèse mais une mise en œuvre à revoir

Les impressions générales de Kristian sont qu'il est intéressant *« d'approche[r] les différents concepts via la synthèse qui est la finalité »*, que les séquences 1 et 2 sont *« OK »,* mais qu'il est *« diffic[ile] d'avoir une idée réelle des connaissances des étudiants soumis à ces séquences »* (spectroscopie, représentation des molécules, mésomérie, pKa, fonctions…).

Il se montre en accord *« avec la difficulté d'utiliser rapidement des concepts sophistiqués pour décrire la réactivité »* et de *« montrer que les modèles sont issus de l'expérience et sont évolutifs »*. Cependant plusieurs problèmes se posent : l'utilisation du mécanisme d'addition-élimination qui est *« le mécanisme de base le plus complexe »*, le *« symbolisme A/D qui ne prend pas en compte la nature des liaisons (σ, π) et leurs propriétés »*, l'introduction trop tardive des flèches courbes, la séquence 3 qui lui semble complexe avec une utilisation des pKa peu convaincante, la classification des types de réactions (document 7).

Il s'interroge sur l'utilisation du terme *« espèce chimique »* plutôt que *« molécule »*, l'élément « Don2 » de la définition du donneur, le sens que peut avoir un mécanisme sans flèches (document 8) et si par conséquent la mésomérie et la conjugaison en prérequis ont été abordés sans les flèches.

En conclusion il nous semble que Kristian est favorable à un enseignement progressif des modèles, mais nos choix concernant la nature et l'ordre des éléments théoriques et du symbolisme lui posent problème pour une mise en œuvre.

2.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation

Danielle et Kristian se focalisent sur la conception d'une séquence introduisant les mécanismes réactionnels.

La séquence qu'ils proposent débute comme l'exemple de séquence n°3 de l'artefact. La tâche n°1 (analyser la transformation chimique de l'espèce chimique principale) est conservée mais Danielle et Kristian envisagent de trouver une autre synthèse avec différents types de mécanismes dont celui de l'hydrolyse basique d'un ester. L'analyse de la synthèse est faite en termes de liaisons rompues et formées, et ils utilisent la classification des transformations chimiques selon un document qui serait similaire au document 7 (tome 2, p.55). La suite de leur séquence vise à faire découvrir les mécanismes. Ils choisissent pour cela d'introduire les principales notions (A/D, polarisation/polarisabilité, pKa et critère du ΔpKa) et le symbolisme de la flèche courbe sur un exemple jugé plus simple (le chlorure d'hydrogène HCl). Pour la suite ils envisagent d'étudier les substitutions nucléophiles sur les atomes de carbone hybridés sp^3 (dérivés halogénés, etc.) avant celles sur les atomes de carbone hybridés sp^2 (esters). L'étude de l'hydrolyse des esters est faite à partir de plusieurs propositions de mécanismes que les étudiants discutent à partir des résultats des expérimentations disponibles.

Danielle et Kristian discutent beaucoup autour des définitions utilisées dans l'artefact et de la progressivité pour introduire les concepts et le symbolisme. Nous détaillons donc ces deux aspects ci-dessous.

2.2.1. Des problèmes de définitions

Danielle et Kristian rencontrent différents problèmes au niveau des définitions.

Dans la classification des transformations en addition, substitution, etc. à partir de leur schéma de synthèse (document 7, artefact, p.55), Kristian est gêné par nos définitions de l'élimination et de l'addition. Pour lui il doit y avoir apparition ou disparition d'un doublet π là où nous ne mentionnons qu'un doublet liant (σ ou π). Remarquons que Noël est aussi gêné par cet aspect de la définition.

Nous remarquons que la classification que nous avons choisie s'entrechoque avec celle en fonction du degré d'oxydation pour Danielle et Gaëlle. Elles reconnaissent une oxydation dans l'exemple d'élimination que nous donnons et elles semblent penser que pour nous les oxydations sont incluses dans la classe élimination. Nous avions fait exprès de choisir un exemple d'élimination qui ne soit pas associé aux mécanismes E1 ou E2 sur des dérivés halogénés ou alcools, sans prévoir qu'il y aurait un conflit avec l'autre classification.

> *D- « Et bien déjà moi l'oxydation je la classe à part, je ne la classe pas dans la réaction d'élimination. »*
> *K- « Oui mais pourquoi pas… enfin si… au niveau mécanisme ça correspond bien à une élimination. »*
> *D- « Oui »*
> *K- « Quand tu auras mis ton chrome là, tu vas bien arracher ce proton et faire une double liaison. Moi ça, ça ne me dérange pas trop… Mais c'est plus qu'on me dise apparition d'un doublet liant parce que ça veut dire qu'il y a des réactions… alors attends… Tu sais il y avait un exercice… »*
>
> *Danielle et Kristian (annexe, D78-79 / K84-85)*

Nous nous demandons si les qualificatifs d'« oxydation », « addition », etc. ne sont pas usuellement associés à des réactions comme autant de mots-clés à connaître sans avoir réellement réfléchi à leur signification ou leur justification. Nous retrouvons ces relations entre réactions et mots-clés dans l'extrait ci-dessous.

> *« Mais moi ça ne me plaît quand même pas beaucoup [… de] dire qu'une lactonisation c'est une élimination… Et bien oui c'est ça… En même temps c'est vrai que tu dis qu'une lactonisation est une déshydratation, et qu'une déshydratation tu la places habituellement dans les éliminations. Donc c'est vrai que c'est logique quelque part mais… »*
>
> *Kristian (annexe, K423)*

Lorsque Danielle est confrontée au problème de l'oxydation, Kristian lui montre que du point de vue mécanistique ce doit être aussi une élimination. Nous retrouvons plusieurs fois ce fonctionnement de Kristian sur le mode des mécanismes réactionnels : par exemple lors de la tentative de classification d'une estérification intramoléculaire, son objet d'étude est la fonction acide carboxylique car elle subit le mécanisme sous-jacent d'addition-élimination, alors que pour nous l'objet d'étude est la molécule dans son intégralité (avec une fonction acide carboxylique et une fonction alcool). Ainsi Kristian ne parvient pas à s'affranchir de la grille d'analyse mécanistique qu'il a intériorisée, quand il aborde les classifications de transformations.

> *« Du coup définir ça comme une élimination et sachant qu'après au niveau mécanistique ça ne sera pas du tout une élimination, moi ça me dérange. »*
>
> *Kristian (annexe, K357)*

De la même façon l'attribution du terme « substitution » à une transformation qui se ferait selon un mécanisme d'addition-élimination inquiète Danielle et Gaëlle qui voient là une source de confusion pour les étudiants. Noël préfère le terme d'« échange » que nous proposions, à celui de « substitution ». Gaëlle et Hélène envisagent d'enlever cette classification des transformations et d'appliquer plutôt ce type de classification à chaque étape des mécanismes. Le problème est loin d'être résolu et cette réflexion devra être approfondie ultérieurement.

Les définitions des « réactifs principal »/ « secondaire(s) » et du « site réactif » posent aussi problème. Si Kristian perçoit un peu l'intérêt de choisir l'objet d'étude (« principal »), il pense que cela ne règle pas vraiment les problèmes liés à l'utilisation de « substrat » / « réactif ». Danielle et Kristian se focalisent aussi sur la limite de cette définition dans le cas de synthèses convergentes où deux réactifs sont principaux. Ensuite pour Danielle *« le site réactif […] est celui qui subit une réaction chimique »* (D279). Sa définition est simple mais elle nous semble plus floue et donc moins opérationnelle ; d'un autre côté peut-être que nous augmentons la difficulté en rendant la définition trop précise. Il serait intéressant ici d'étudier les réactions des étudiants pour trancher. Une nouvelle fois ce qui pose problème à Danielle et Kristian au niveau de la définition de « site réactif » c'est qu'ils l'abordent par rapport au mécanisme réactionnel alors que nous le définissions au niveau de la

transformation. Nous leur suggérons alors de parler de « site réactif apparent ». Ils intègrent cette précision de vocabulaire à défaut de mieux car il leur est difficile de modifier rapidement une définition qui est imbriquée avec les autres : site réactif / espèce chimique principale / classe d'une transformation.

Il est donc nécessaire pour nous de poursuivre la réflexion sur ces définitions et leur lien potentiel avec les difficultés des étudiants en chimie organique.

2.2.2. La construction d'une progressivité pour introduire les concepts et le symbolisme

Danielle et Kristian ne trouvent pas que l'approche utilisée soit suffisamment progressive. Kristian est gêné en particulier par l'utilisation tardive des flèches courbes, le fait de ne pas utiliser les caractéristiques des liaisons σ et π ou les notions de polarisation/polarisabilité au moment d'aborder les modifications de liaisons dans les mécanismes, c'est-à-dire dès le début de l'introduction des mécanismes.

> *« Il me semble… Et à ce moment-là tout de suite aussi… si tu parles de coupure de liaisons, tu vas forcément parler de polarisabilité donc c'est pareil… C'est quelque chose… Soit qu'il y a un prérequis soit qu'on explique dans ce cours-là… Et si tu parles de polarisabilité tout de suite tu vas expliquer qu'une liaison π est beaucoup plus polarisable, que ça sera la première à se couper, etc. »*
>
> *Kristian (annexe, K21)*

C'est pourquoi Danielle et Kristian envisagent une progressivité par rapport aux mécanismes réactionnels abordés : le plus simple (dissociation/association du chlorure d'hydrogène HCl, et sa réaction avec l'eau), en passant par les substitutions nucléophiles, avant de traiter celui d'addition-élimination qui est le plus complexe. Ils sont alors amenés à introduire les différents concepts essentiellement sur le premier mécanisme : association/dissociation, polarisation/polarisabilité, mouvements d'électrons avec les flèches courbes, jusqu'au pKa et au critère du ΔpKa. L'introduction dans cette séquence du diagramme énergétique est aussi envisagée au niveau des substitutions S_N1 et S_N2 venant ensuite.

Cathy et Noël sont gênés aussi par le fait que les notions de polarisation de liaison arrivent en fin de séquence, mais finalement Noël comprend et accepte l'idée de décrire d'abord des mécanismes proposés et de les interpréter ensuite à l'aide des caractéristiques des liaisons (polarisation, etc.). Pour Danielle et Kristian il apparaît que dès qu'on s'intéresse au mécanisme il faut pouvoir l'interpréter d'où la nécessité d'établir tous les concepts utiles

dès le premier mécanisme. La démarche utilisée avec le chlorure d'hydrogène n'est plus tout à fait une démarche de modélisation mais plutôt une présentation de concepts utiles pour les mécanismes de chimie organique illustrés sur l'exemple du chlorure d'hydrogène. Leur plan nous semble effectivement progressif en ce qui concerne la nature des mécanismes. Cependant nous pensons que la difficulté et donc la progressivité à installer ne doivent pas être seulement évaluées en fonction de la nature des mécanismes mais aussi par rapport à la nature des tâches affectées aux étudiants. C'est pourquoi nous proposions de décrire les éléments des mécanismes avant d'introduire progressivement les éléments de leur interprétation.

Les enseignants ont l'habitude d'introduire les flèches courbes dès le début ce qui semble les empêcher de lire facilement le document 8 (tome 2, p.56) présentant 4 propositions de mécanismes mais sans flèches courbes.

> *N- « Non, non, c'est juste qu'en fait quand on va leur balancer les mécanismes, que ce que… enfin quand j'ai vu la page comme ça je n'ai même pas regardé au milieu parce que j'ai trouvé ça compliqué… Je me dis que peut-être du coup pour les élèves… parce que comme il n'y a pas les… moi ce qui me parle c'est les flèches… »*
> *C- « Oui alors déjà mettre en couleur ce qui varie déjà. »*
> *N- « Ah oui, d'accord. C'est pas mal. »*
>
> *Cathy et Noël (annexe, C436 / N477-478)*

> *H- « Sans flèches moi je n'y arrive pas »*
> *G- « Sans flèches je n'arrive pas à les lire je suis d'accord »*
> *H- « Mais c'est peut-être parce qu'on est habitué. »*
> *G- « Parce que lui il suppose le mécanisme… le… »*
> *H- « Le formalisme des flèches les embrouille ? »*
> *G- « Le formalisme des flèches il l'introduit après j'ai l'impression. Mais moi sans flèches je ne peux pas. Tu vois il l'introduit à la fin. Moi je ne peux pas. »*
> *H- « Moi non plus. Je n'y arrive pas. Je ne vois pas ce qui se crée ou pas. »*
> *G- « Moi je le ferais bien avec des flèches »*
> *H- « Et puis on leur fait utiliser la craie 4 couleurs aussi. »*
>
> *Gaëlle et Hélène (annexe, G571-574 / H596-600)*

Il semble que les enseignants aient du mal à faire autrement qu'introduire les flèches courbes assez tôt, quitte à tenter d'améliorer l'apprentissage de ce symbolisme en passant par une mise en couleur des doublets déplacés à chaque étape. En outre il s'esquisse pour Cathy et Noël un problème que Danielle et Kristian révèlent finalement : nous n'avons indiqué nulle part que lors d'une étape d'un mécanisme réactionnel les déplacements

électroniques sont concertés et les plus simples possibles. Nous envisageons de le préciser à l'avenir ce qui pourrait permettre une lecture plus facile des mécanismes.

> *K- « Comment décrire AD ou ADD, si on utilise ce formalisme, avec un schéma comme ça sans flèches ? Parce que là on a écrit AD mais on aurait pu écrire ADAD en coupant et en formant deux liaisons… C'est-à-dire que… »*
> *[…]*
> *D- « Il peut se passer n'importe quoi »*
> *K- « Voila il peut se passer n'importe quoi effectivement. Et je ne sais pas quels sont les critères qui vont permettre aux étudiants de dire c'est AD. Alors est-ce qu'il faut dire aux étudiants qu'il faut choisir la solution la plus simple. Peut-être mais à ce moment-là il faut bien le dire... Parce que là on pourrait imaginer qu'on forme cette liaison, en même temps qu'on forme celle-là, en même temps qu'on coupe celle-là, en même temps qu'on coupe celle-là et ça pourrait être un ADDD tout concerté… Les étudiants ils ne savent pas ce que c'est au départ. »*
>
> *Danielle et Kristian (annexe, D26 / K25, 28)*

Notons que notre travail de conception visait en priorité le développement de PCK sur l'enseignement de la modélisation, sur celui de la synthèse organique et sur la gestion des phases de conclusion, mais pas directement sur le symbolisme. La question de l'apprentissage d'un symbolisme mériterait certainement un cadrage théorique à part entière afin d'optimiser nos propositions en ce domaine. Remarquons à ce propos qu'après un échange avec Noël au sujet du signe égal que nous avions introduit dans l'écriture des mécanismes, nous avons décidé de réserver le signe égal pour l'équation de réaction, la flèche simple pour le schéma de synthèse (puisqu'il s'agit d'une transformation d'une espèce chimique principale d'un état initial vers un état final), et enfin les deux flèches tête-bêche pour chaque étape du mécanisme réactionnel (ce qui indique leur réversibilité microscopique).

3. La genèse instrumentale pour le binôme Gaëlle & Hélène (STS Chimiste)

Gaëlle et Hélène enseignent toutes les deux en STS Chimiste depuis plusieurs années. Gaëlle a l'expérience de l'enseignement de la chimie organique en première année, alors qu'Hélène a enseigné cette discipline en deuxième année.

Nous présentons ci-dessous leurs réponses au questionnaire « premières impressions », puis nous mettons en avant quelques résultats obtenus lors de la simulation de préparation de cours.

3.1. Les « premières impressions »

Ici est décrit l'essentiel des réponses des deux enseignantes au questionnaire « premières impressions »

3.1.1. Gaëlle : une approche intéressante mais nécessitant une refonte des cours, programme et examens

Gaëlle est partagée entre des éléments qu'elles trouvent très intéressants et d'autres qui la questionnent. Ainsi elle apprécie le rapprochement du cours avec l'aspect expérimental, le report à plus tard des mécanismes complexes, le code de schématisation explicite, la notion de donneur/accepteur et surtout la séquence n°4 utilisant des critères certes plus lourds (ΔpKa) mais qui permettent de prévoir des réactions. Cependant elle n'est pas d'accord avec la place trop tardive de la stéréochimie.

Enfin Gaëlle s'interroge sur l'introduction tardive du symbolisme de la flèche courbe, la place qui est faite ici aux réactions explicitement au programme et l'introduction de concepts trop théoriques en STS (Eyring, Hammond, etc.). Gaëlle souligne enfin l'importance des exigences de l'examen et du programme actuels, et elle s'interroge sur les conséquences de diminuer les *« exigences de connaissances »* (de l'examen) au profit des *« exigences de compréhension »* de notre approche. Pour elle la progression proposée ne sera possible qu'avec une refonte du programme de BTS.

En conclusion Gaëlle adhère en partie à l'approche mais pense qu'une telle transformation dépasse le cadre de l'enseignant.

3.1.2. Hélène : des envies de réinvestir malgré un document dense qu'il est difficile de s'approprier

Pour Hélène le document fourni est *« très dense et riche »*, la *« démarche [est] structurée et argumentée »*, et des idées ponctuelles l'interpellent et lui donnent l'envie de réinvestir. Cependant *« plusieurs lectures ont été nécessaires pour tenter de s'approprier le contenu et avoir une vision d'ensemble de la progression* ».

Elle trouve intéressant de placer la synthèse organique au cœur de la démarche et ce dès le début de la formation, ce qui devrait susciter beaucoup d'intérêt auprès des étudiants. En outre elle apprécie de voir disparaître la partie préliminaire de présentation de la réactivité qu'elle juge *« très rébarbative et peu attractive pour les étudiants »*.

Ce qui lui pose davantage problème est la complexité du contenu pour un élève moyen, notamment l'utilisation de molécules complexes et *« effrayantes »* dès le début, les *« arrangements structurel / fonctionnel »* et la place de la stéréochimie en fin de progression empêchant son assimilation par un entraînement régulier.

Elle se demande enfin comment présenter le panorama des différentes transformations (partie 2) sans faire appels aux concepts abordés dans les mécanismes (partie 3), et surtout s'il y aura d'autres ressources pédagogiques.

En conclusion Hélène a envie de réinvestir et de faire évoluer son enseignement, mais l'artefact doit encore progresser pour l'y aider.

3.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation

Lors de la simulation de préparation de cours Gaëlle et Hélène ont d'abord l'impression de tourner en rond et que la tâche est trop difficile pour elles. Elles discutent ainsi longtemps de la progression afin de pouvoir placer plus précisément leur séquence dans une suite logique de notions. Finalement elles parviennent à dénouer certains blocages pour proposer les principaux éléments d'une progression et d'une séquence.

Elles reprennent les trois premières parties de notre progression, couplent les parties 4 (rétrosynthèse) et 6 (stéréochimie) ; quand aux notions de la partie 5 (thermodynamique et cinétique) elles sont dispatchées au moment où l'étude de certaines réactions le nécessite.

Pour introduire leur séquence, Gaëlle et Hélène envisagent de trouver une synthèse comme celle de la juvabione mais incluant une hydrolyse d'ester. Le cours proprement dit commencerait par une rapide classification des mécanismes et des étapes intermédiaires, associée aux définitions de donneur/accepteur et du formalisme de la flèche courbe. Comme pour Danielle et Kristian nous retrouvons là le besoin d'introduire plusieurs notions dès le début du cours. Gaëlle et Hélène traitent ensuite le mécanisme d'addition nucléophile avant de s'intéresser plus particulièrement à celui de l'hydrolyse basique des esters. Pour celui-ci elles suivent l'idée de proposer différents mécanismes, dont l'un d'eux est validé à l'aide des expériences de marquage isotopique. Elles envisagent d'introduire ensuite le critère du ΔpKa avant de passer à la séquence n°4. Elles trouvent cette dernière séquence très intéressante pour son aspect prédictif mais elles la reprennent telle quelle par manque de temps.

Nous détaillons ci-dessous leur travail de reconstruction d'une progression, puis nous abordons leur utilisation des séquences sur la synthèse organique et les initiatives dont elles font preuve en ce qui concerne la modélisation.

3.2.1. Une reconstruction de la progression difficile mais concluante

> *G- « (rires) Vous avez démarré ? Nous on n'a pas démarré (rires). C'est trop dur. »*
> *H- « (rires) Bon on peut réorganiser autrement ? Tu imagines on fait un boulot… on n'y arrivera jamais. »*
> *G- « C'est un boulot d'inspecteur je veux dire (rires). Tu es en train de refaire le programme… (inaudible) »*
> *H- « (rires) On ne peut pas faire ça en 30 secondes. Surtout (inaudible) »*
>
> *Gaëlle et Hélène (annexe, G180-181 / H188-189)*

Gaëlle et Hélène ont des difficultés au début face à l'ampleur de la tâche qu'elles se fixent en reconstruisant une progression qui leur conviendrait mieux. Gaëlle pense que ce serait mieux de *« fai[re] la progression habituelle sauf qu['on] rajoute des choses qu'il a mises. […] Maintenant il faut avoir le temps de les faire… »* (G235). Quant à Hélène elle voit un intérêt d'aller plus loin que Gaëlle dans la transformation de la progression, même si elle se sent handicapée par son expérience car elle est *« ancré[e] dans des habitudes »* (H348).

> *« Alors tu te rends compte. Moi j'avais du mal à me dire : les acquis des élèves à tel endroit… je suis perdue. Et en plus ce qui est dramatique c'est que je raisonne, ce que dit Franck, avec ma grande expérience là, comme il disait tout à l'heure. C'est vrai que ça fait je ne sais pas combien d'années que je le fais, quoique je ne l'ai pas fait chaque année, le cours d'orga… Mais du coup je raisonne avec ce que je leur enseigne moi, donc avec les acquis de ma démarche… Cela ne va pas, c'est biaisé complètement… Je n'arrive pas à me transposer dans son truc. »*
>
> *Hélène (annexe, H299)*

De prime abord Gaëlle et Hélène sont gênées par certains éléments de notre progression. Dans la partie 1 (tome 2, p.14) Gaëlle pense que la spectroscopie de RMN représenterait *« deux semaines de cours »* (G237) à part entière, ce qui est important. Notons que pour Noël la première partie est aussi très chargée avec toutes les techniques et les notions associées ; Muriel aussi trouve difficile de *« mettre toutes les spectros »* (M1) sur le début et Franck remarque alors *« qu'il n'y a pas de précisions sur le contenu »* (F2). En effet nous n'envisagions pas de placer là l'intégralité du cours sur les spectroscopies mais d'en faire seulement une approche empirique. Comme nous l'avions pensé au chapitre précédent (chapitre IV-2) les enseignants associent automatiquement un certain nombre de notions derrière des termes du savoir à enseigner (Chevallard, 1986), et il nous faudra donc prévoir explicitement ce que nous faisons des approfondissements en spectroscopie (place dans la progression, lien vers un cours connexe, etc.) dans le prochain artefact.

Pour Gaëlle et Hélène la partie 5 (tome 2, p.18) est trop théorique pour être réalisée avec leurs étudiants de STS. Elles ne voient pas l'utilité d'ajouter des méthodes d'estimation de l'enthalpie libre de réaction notamment celle d'additivité des incréments de groupe (qu'elles ne connaissent pas), la théorie d'Eyring (qu'elles ont oubliée et qui n'est pas à leur programme) ou le postulat de Hammond (qui n'est pas explicitement à leur programme de chimie organique). Elles s'interrogent aussi sur l'utilité de traiter les contrôles thermodynamique et cinétique qui sont pourtant à leur programme. Elles préfèrent donc *« distiller au fur et à mesure »* (G363) certains éléments théoriques placés dans la partie 5.

Gaëlle et Hélène ont des problèmes concernant la place trop tardive de la stéréochimie et de certains mécanismes (S_N1, S_N2, etc.) : nous les plaçons en effet dans la partie 6 (tome 2, p.19) de notre progression. Elles le justifient tout d'abord par le fait que ces notions difficiles nécessitent d'être répétées sans cesse pour être bien acquises. Nous nous demandons s'il s'agit là de la manifestation de leur conception de l'apprentissage, mais il apparaît que Gaëlle et Hélène sont conscientes que l'examen est essentiellement fondé sur de la restitution *« parce qu'actuellement il faut mémoriser »* (G291), ce qui justifierait de répéter sans cesse. La deuxième justification est liée à la structuration par fonction : lorsqu'une réaction est traitée dans le cours, il faut apparemment lui associer toutes ses caractéristiques y compris stéréochimiques. C'est pourquoi la stéréochimie doit faire partie des outils introduits dès le début. Il nous semble que se manifestent ici des PCK sur la manière d'enseigner chaque réaction de chimie organique, avec toutes ses caractéristiques au moment où elle apparait dans la progression.

Mais peu à peu Gaëlle et Hélène s'interrogent sur l'utilité et la place de la stéréochimie dans la progression, en particulier pour l'analyse conformationnelle dans l'exemple ci-dessous.

> *G- « Relation structure… Stéréoisomérie… C'est quand même bien d'en avoir parlé avant. Ou alors tu l'introduis quand tu fais… Analyse conformationnelle… Est-ce qu'on s'en sert de l'analyse conformationnelle après en BTS à part quand tu fais les sucres ? »*
> *H- « Ils ont des exos à l'examen. »*
> *G- « Des exos là-dessus, mais dans aucune réaction… »*
> *H- « On en a besoin pour justifier... Si sur les sucres avec les anomères. Oui comme tu dis, tu as raison. »*
> *G- « Il n'y a que quand tu fais les sucres. »*
> *H- « Oui. Enfin nous on ne fait que ça. Peut-être qu'il y aurait d'autres… »*
>
> *Gaëlle et Hélène (annexe, G143-145 / H151-153)*

Gaëlle et Hélène se rendent finalement compte que par le choix des exemples sur les premières parties de notre progression il n'est peut-être pas utile de traiter la stéréochimie si tôt.

> *« Tu peux faire des molécules planes au début et t'intéresser à autre chose après […] Ce qui nous intéresserait c'est comment les liaisons sont créées, on s'en fiche de… »*
>
> *Hélène (annexe, H533-534).*

Elles envisagent donc de reporter l'enseignement de la stéréochimie un peu plus tard dans la progression, sans pour autant la traiter tout à la fin. Par conséquent les substitutions nucléophiles S_N1 et S_N2 seraient enseignées en deux fois : une première fois en première année lors de la découverte des mécanismes réactionnels sur la base des ruptures et formations de liaisons, puis une deuxième fois l'année suivante où elles les détailleraient en incluant des considérations stéréochimiques. Danielle et Kristian ont aussi envisagé cette possibilité.

> *G- « Mais non, ça veut dire que si tu le faisais comme ça, en deuxième année tu le reprends. »*
> *H- « Et bien oui, et pourquoi pas ? Et bien moi c'est ce que j'ai compris dans sa démarche et que je trouve bien, c'est pourquoi traiter forcément tous les problèmes en même temps ? »*
> *G- « Oui. »*
> *H- « Ce n'est pas obligé. »*
>
> *Gaëlle et Hélène (annexe, G518-519 / H542-543)*

Un autre aspect de notre approche a particulièrement déstabilisé Gaëlle et Hélène. Il s'agit de la place des réactions de chimie organique. Le programme actuel est très précis sur les réactions à enseigner et elles aimeraient savoir où nous étudions les caractéristiques de chaque réaction dans notre progression. Ce problème est décrit dans l'extrait ci-dessous (que nous avons réduit pour en faciliter la compréhension).

> *H- « En fait on est déstabilisé parce qu'on ne voit plus nos réactions. »*
> *[…]*
> *G- « Voilà, on ne sait pas. On voudrait que tu prennes ça et que tu nous dises : ça on va le mettre là, là, là… […] Parce que toi tu les mets en exemples les réactions alors que nous c'est*

notre point de départ
[…]
Sauf que nous on veut qu'ils connaissent les réactions, alors que là elles sont en exemple si tu veux…. […] Parce que toi tu utilises les réactions pour comprendre les concepts, et nous on utilise les concepts pour comprendre les réactions. »
A- « Ça va dans les deux sens en fait pour moi. »
[…]
G- « Et attends, on a besoin d'un truc vachement poussé je pense. Parce que quand tu vois la description du programme, elle est super pointue sur les réactions - mais en fait elle ne parle que des réactions d'ailleurs - alors que toi… »

Échange avec Gaëlle et Hélène (annexe, G324-326, 328, 335/ H336 / A116)

Si nous avons conscience qu'un certain nombre de réactions génériques doivent être mémorisées compte tenu de l'examen actuel, les réactions devraient aussi permettre de construire les concepts de la réactivité et de concevoir des stratégies de synthèse organique. Pour Gaëlle et Hélène les objets d'enseignement sont les réactions, les concepts n'étant utilisés que comme support à leur compréhension et leur mémorisation. C'est pour cela que le contenu de la partie 2 (stratégie de synthèse organique) gêne Gaëlle et Hélène car *« pour qu'ils mémorisent [ils ont] besoin des mécanismes »* (G284). Elles ne parviennent pas à savoir à quel moment de la partie 2 nous traitons les réactions chimiques comme elles le font habituellement, par conséquent elles envisagent de structurer cette partie par fonction ou par regroupement de fonctions. Finalement le statut des réactions de chimie organique s'enrichit peu à peu : par exemple Gaëlle envisage le glissement de certaines réactions étudiées en 2ème année pour les utiliser aussi comme exemples dans l'introduction des outils théoriques de première année.

Au fil de la simulation nous observons que Gaëlle et Hélène évoluent petit à petit d'une progression par fonction à une progression structurée par type de réaction, puis lors de leur tentative de réorganisation des réactions au programme elles envisagent d'en *« traiter […] en chimiosélectivité »* (H469) ou d'en *« rev[oir] dans les protections et les stratégies de synthèse »* (H586). Elles aboutissent finalement à une progression en spirale avec des approfondissements successifs : en première année elles garderaient nos parties 1, 2 et 3 (en y incluant les principaux mécanismes réactionnels de base), puis en 2ème année seraient envisagés des approfondissements avec des problèmes de sélectivité (chimiosélectivité, rétrosynthèse, stéréosélectivité). Nous retrouvons donc la plupart des éléments de notre exemple de progression.

« Ça s'est bien, on n'est pas mal là. »

Hélène (annexe, H387)

3.2.2. Une réutilisation quasi intégrale des séquences sur la synthèse organique et de la réactiothèque

H- « Moi franchement, je trouve super positif tout le début, avec la juvabione. »
G- « La stratégie… je trouve ça vachement bien, quitte à ne pas y passer autant de temps. »
H- « Avec les histoires de rendements et tout ça. Si c'est bien. »
G- « Oui le coup des rendements… »
H- « C'est super bien. »
G- « …c'est vraiment bien fait. Les schémas… »
H- « (chevauchement) Les schémas parallèles, en série et tout ça, comment ils appellent ça ? »
G- « Au moins tu vois un aspect pratique. Ça c'est très pratique. »
H- « Voilà synthèse convergente et synthèse linéaire… En plus tu peux faire un lien avec les TP, ça c'est vachement bien. »
G- « Je pense qu'il s'est planté là page 28, Troost & Keeley, Gueldner et al., j'ai l'impression qu'il s'est mélangé les pinceaux là, non ? »
H- « Pourquoi ? »
G- « Je ne sais pas dans ses annexes ce n'est pas cohérent. »[1]

Gaëlle et Hélène (annexe, G184-189 / H191-196)

Gaëlle et Hélène adhèrent à l'essentiel des deux séquences introduisant la synthèse organique. Elles apprécient le côté pratique, l'utilisation des rendements comme critères simples de validation d'une synthèse, etc. Ces séquences renvoient Hélène à son activité, car elle trouve que justement elle *« n'insiste pas assez sur la stratégie de synthèse »* (H90) et qu' *« on est trop sur trois atomes de carbone »* (H91). Elle *« trouve bien [d'] expliquer ce qu'est la stratégie de synthèse organique sur des grosses molécules »* (H77). Gaëlle trouve positif que nous ayons posé le code de schématisation des synthèses organiques, et Hélène apprécie nos remarques sur la nomenclature « substrat »/ »réactif » dans la bulle p.21 (tome 2).

Cependant Gaëlle s'inquiète de voir apparaître des espèces chimiques compliquées (DMSO, TBDMSCl, LDA, etc.) dans la synthèse de la juvabione au début de la séquence n°1. Comme nous l'avons déjà indiqué pour les précédents binômes, il faut dissocier la complexité de ces espèces chimiques de la complexité des tâches que nous avons associées à la synthèse de la juvabione : en effet nous ne demandions pas d'expliciter la nature et le rôle de ces espèces chimiques.

Quant à Hélène, elle dit avoir eu des soucis dans l'utilisation des notions d'aménagements structurel et fonctionnel et elle s'interroge sur l'utilité de ces notions pour les étudiants. En

[1] Nous avons effectivement inversé par erreur les références des deux synthèses utilisées dans l'évaluation finale de la séquence n°1 (tome 2, p.28). Cela nous aura montré que Gaëlle a consulté les articles originaux que nous avions mis en annexes dans l'artefact et qu'il serait utile de les garder dans le prochain artefact.

se référant à l'une des bulles de la page 23 (tome 2) Gaëlle fait apparaître que le problème d'Hélène est lié à sa définition trop restrictive du groupe fonctionnel, excluant les liaisons carbone-carbone double et triple. Quant à l'intérêt pour les étudiants, nous pensons maintenir ces définitions car il s'agit-là de notions qui existent dans les livres de synthèse organique, qui permettent d'insister sur les finalités des transformations de chimie organique et qui font travailler les étudiants sur la reconnaissance des différents groupes fonctionnels et la représentation des molécules.

Hélène ne comprend pas bien non plus la tâche qui consiste à *« décrire en quelques phrases les grandes lignes du protocole expérimental »* (H197) à partir de la synthèse schématisée, dans l'évaluation de la séquence n°1 (tome 2, p.28). Enfin Hélène trouve *« indigeste »* (H120) le document page 41 (tome 2) même s'il a l'intérêt de résumer : il s'agit de l'extrait de Smith (1994) avec une roue des fonctions et les principales transformations associées. Toutes ces remarques impliqueront des corrections dans une version ultérieure de l'artefact.

Enfin l'intégration d'une ébauche de réactiothèque à l'artefact a eu des effets à la fois sur les enseignantes et sur l'artefact lui-même. Tout d'abord la réactiothèque a comme nous l'escomptions, ouvert des possibles et donné des idées aux enseignantes. Par exemple Hélène aimerait bien créer un cahier de réactions ou un répertoire avec plusieurs entrées, qu'elle ferait utiliser en interaction avec des exemples de synthèses organiques.

> *H- « Voilà. A mon avis il faut faire un tableau double-entrée. Par contre c'est son truc qui m'a donné l'idée, je le fais mais je ne le faisais pas rentrer… C'est-à-dire un cahier où tu dis comment transformer un alcool en machin, et… »*
> *G- « Oui préparation d'une espèce chimique. Truc donne B et A donne truc. »*
> *H- « Et puis même création de liaisons CC, création de liaisons carbone oxygène, création de liaisons doubles carbone-carbone.*
> *G- « Hmm. Ce que tu leur fais plutôt à la fin d'ailleurs en général et qu'on va leur donner dès le début. »*
> *H- « Oui il faudrait… Dès qu'on a une réaction, on la caserait dans tel truc. […] Parce qu'après quand on fait de la rétrosynthèse ils sont un peu handicapés justement. On ne va toujours que dans un sens. […] Donc ça, ça me donnerait des idées je trouve.*
> *[…]*
> *G- « Je ne sais pas s'il faudrait tout donner dès le départ ou alors le remplir… Tu fais cocher… »*
> *H- « Au départ, je trouve que c'est bien sa démarche qu'à partir d'une synthèse ils retrouvent les transformations. Ça fait se familiariser avec les fonctions et tout. »*
> *G- « Oui. »*
>
> *Gaëlle et Hélène (annexe, G116-177, 126-127 / H123-127, 134)*

Gaëlle et Hélène intègrent facilement la réactiothèque dans leur activité en lui affectant différents rôles : lors de la restructuration de la progression elles y placent explicitement des

réactions *« atypiques »* (H446) qu'il est inutile de mémoriser ou des réactions qu'elles ne traitent pas d'un point de vue mécanistique, elles utilisent aussi la réactiothèque comme un moyen d'invalider une des propositions de mécanismes de l'hydrolyse des esters. Notons que Franck s'en servirait aussi en y piochant des exemples réels de transformations sur lesquels appuyer son enseignement des mécanismes réactionnels.

3.2.3. Quelques initiatives en matière de modélisation

Enfin nous relevons quelques indices qui laissent supposer que Gaëlle et Hélène commencent à développer des PCK sur l'enseignement de la modélisation.

Gaëlle et Hélène améliorent quelque peu le travail sur les propositions de mécanismes réactionnels en définissant une tâche selon laquelle les étudiants doivent prévoir et repérer explicitement pour chaque mécanisme où se situerait l'atome d'oxygène-18 dans les produits. Ensuite les étudiants sont confrontés aux résultats expérimentaux de la publication pour pouvoir conclure. Elles imaginent aussi utiliser *« les résultats d'une analyse au labo »* (H909) pour invalider le mécanisme 4 ou alors la réactiothèque, puisque ce mécanisme ne conduit pas aux produits de l'hydrolyse des esters.

Gaëlle apprécie particulièrement la séquence 4 qui permet de prévoir des réactions en réutilisant ce qui a été construit dans la séquence 3, cela justifie ainsi d'y avoir passé du temps. Enfin Gaëlle et Hélène aimeraient pouvoir étudier d'autres types de réactions selon une démarche de modélisation dans le même esprit que pour l'hydrolyse basique des esters.

4. La genèse instrumentale pour le binôme Muriel & Franck (STS Chimiste)

Muriel enseigne en STS Chimiste depuis une dizaine d'années et elle a eu l'occasion d'assurer les cours et les travaux pratiques de chimie organique en $1^{ère}$ et $2^{ème}$ années. Quant à Franck son expérience de l'enseignement supérieur de la chimie organique est limitée à une année en CPGE-PCSI avant son affectation en STS Chimiste où il n'a pas eu l'occasion jusqu'à présent de mettre en œuvre cet enseignement.

Nous décrivons ci-dessous le contenu des réponses au questionnaire « premières impressions » de Muriel et de Franck, puis nous présentons quelques résultats remarquables obtenus lors de la simulation de préparation de cours.

4.1. Les « premières impressions »

4.1.1. Muriel : une approche intéressante mais difficile à mettre en œuvre

L'impression générale de Muriel est que *« c'est une approche intéressante, mais qui [lui] semble difficile à mettre en œuvre »*. Elle apprécie en particulier la première partie, et l'idée d'utiliser une réactiothèque lui semble intéressante. Cependant ce qui lui pose problème est la définition d'une substitution à partir du bilan alors que le mécanisme est celui de l'addition-élimination, ou encore l' *« introduction massive »* des spectroscopies en début de programme. Elle se demande enfin *« où trouver la documentation nécessaire »*.

En conclusion Muriel adhère en partie à l'approche portée par l'artefact.

4.1.2. Franck : une réforme ambitieuse dont la mise en œuvre nécessite plus de détails

Pour Franck il s'agit-là d'une véritable réforme et les séquences proposées sont trop ambitieuses : elles demanderaient d'être décortiquées et étalées sur plusieurs séances. Franck est plutôt en accord avec la progression proposée même s'il ferait quelques adaptations : modification de la partie 2, inversion des parties 4 et 5, et ajout d'une partie *« bilan – procédés unitaires »*. Il accueille aussi favorablement le nouveau formalisme du type A/D. Cependant il pense que le changement dans le contenu est trop important pour qu'il soit applicable directement (il faudrait donc plusieurs étapes) et qu'il risquerait d'être difficilement apprécié par les *« conservateurs »*. Il demande aussi des explications claires pour une mise en application efficace.

Enfin Franck s'interroge sur le contenu de la réactiothèque : présence ou non de synthèses dans la réactiothèque, distinction claire entre transformations à connaître par les étudiants et les autres pour éviter de rendre les étudiants trop *« réactiothécodépendants »*, il propose alors de prévoir dans la réactiothèque une partie *« non fournie à l'examen »*.

En conclusion Franck s'interroge sur l'ampleur de la transformation portée par l'artefact et il réclame plus de détails pour mieux l'appréhender et mieux évaluer sa mise en œuvre.

4.2. Quelques résultats obtenus lors de la simulation

Muriel et Franck débattent tout le temps de la simulation mais ils ne réussissent pas à se mettre d'accord sur un plan de séquence. Plusieurs pistes sont envisagées, discutées, abandonnées, reprises ou travaillées. Ils arrivent malgré tout à l'idée de faire travailler les élèves sur plusieurs réactions différentes (plusieurs mécanismes réactionnels) afin qu'ils

construisent les éléments théoriques transversaux de la réactivité en chimie organique. Leur binôme est le seul parmi les quatre se prêtant à la simulation, qui n'aboutit pas à un plan de séquence, même succinct. Il s'agit pour nous d'une opportunité car ce qui les empêche de réaliser la tâche assignée fait partie de leur activité (Clot,1999) et mettrait peut-être en lumière des lacunes de notre artefact.

4.2.1. Deux approches opposées des mécanismes réactionnels et de leur enseignement

Nous considérons les mécanismes réactionnels comme des modèles construits lors de va-et-vient entre des éléments théoriques sur la réactivité chimique et des faits expérimentaux. En tant que modèles ils portent la double fonction d'interprétation et de prévision, et leur enseignement doit permettre l'articulation explicite entre les registres (chapitre II-1). Nous constatons que Muriel et Franck ont des conceptions opposées concernant les mécanismes réactionnels et leur enseignement, chacun privilégiant davantage l'entrée par l'un des registres : Muriel utilise exclusivement l'entrée théorique pour prévoir le déroulement de réactions, quant à Franck il souhaite prendre appui sur l'entrée empirique pour faire émerger certains éléments théoriques.

Nous observons que même si Muriel a bien compris nos arguments et certains de nos choix inscrits dans l'artefact, elle ne parvient pas à sortir de sa logique d'introduction des mécanismes réactionnels et des éléments théoriques de la réactivité. En effet elle semble sensible à l'argumentaire initial, avec notamment la présence de difficultés des étudiants lors de l'introduction des mécanismes réactionnels, le problème de la signification de la flèche courbe pour eux, le regroupement de beaucoup de mécanismes et d'éléments théoriques variés dès le chapitre des alcènes en raison de la structuration par fonction. Elle a compris aussi le but de l'exemple de séquence n°3 impliquant un positionnement en début de formation et non pas à sa place usuelle en fin de deuxième année.

> *« Et non pas pour l'introduire en tant qu'hydrolyse des esters en elle-même, ce n'est pas ça qui nous intéresse… […] Mais c'est sur comment comprendre comment ça marche, pourquoi on fait comme ça et comment on représente un mécanisme à la fin… Comment on représente sur le papier ce qui se passe à l'intérieur des molécules. Oui donc on le fait en premier cours de première année. Youpi ! (rires) »*
>
> *Muriel (annexe, M30-31)*

Muriel a aussi intégré la notion de donneur/accepteur dans son discours et comprend l'intérêt de la contextualisation des transformations citées dans la réactiothèque. Cependant

elle ne parvient pas à concilier la logique de son enseignement et celle portée par notre artefact.

> *« Mais disons que le problème c'est que… enfin moi je vais avoir du mal à sortir à la fois de mon esprit à moi et de ce qui est ici, de ce qui est dans le document. […] Parce que ce qu'il y a dans mon esprit à moi me paraît logique, ce qu'il y a dans le document là me paraît tout à fait bien et logique, mais alors comment construire un truc qui ne soit ni… ? […] Ça ne va pas forcément ensemble ».*
>
> *Muriel (annexe, M62-65)*

Muriel n'est pas convaincue par l'idée de fournir aux étudiants plusieurs propositions de mécanismes à confronter aux faits expérimentaux. Pour elle le jeu est faussé car nous prétendons vouloir leur faire trouver un mécanisme alors que tout est donné, les étudiants n'ayant plus grand-chose à faire. Dans son optique la démarche est inversée : les étudiants doivent trouver les mécanismes à partir de considérations structurales sur les réactifs et d'éléments théoriques donnés lors d'un chapitre introductif, sans nécessiter de mémorisation superflue.

> *« C'est-à-dire que je ne commence pas par regarder où est-ce qu'il va y avoir des liaisons qu'on a enlevées, où est-ce qu'il y a des liaisons qu'on a formées, etc. Je pars des deux réactifs de départ, je cherche où sont les $\delta+$, les $\delta-$, qui peut réagir avec qui, et à partir de là qu'est ce qu'on peut former comme type de liaisons. […] Alors que lui il fait dans l'autre sens en fait. Il part de la molécule finale, il compare à la molécule de départ : quelles sont les liaisons qu'on a formées ? Et à partir de là, revenir à… […] j'ai l'impression de faire la démarche dans l'autre sens en fait. Parce que là, écrire les flèches du mécanisme c'est la finalité alors que moi à la limite c'est presque le début. »*
>
> *Muriel (annexe, M67-71)*

> *« Ah oui ça de mémoire, oui, oui. Moi je veux qu'ils ne sachent rien de mémoire. Tu vois même là tu m'avais dit l'aldolisation, je suis obligée de prendre mon crayon et d'écrire. […] Parce que je ne connais pas par cœur le bilan du truc, je ne sais faire que… […] Moi je suis contre la chimie organique du par cœur, je ne la connais pas par cœur. Des fois Hélène me dit : sur telle réaction… Euh, attends, je prends mon papier, mon crayon, tu me dis on part de quoi. »*
>
> *Muriel (annexe, M394-395)*

Nous pensons qu'il s'agit là de manifestations du genre professionnel que nous avons déjà décrites : les PCK qui semblent actuellement partagées par la communauté des enseignants de chimie organique favorisent l'enseignement des mécanismes réactionnels par l'entrée théorique avec comme idée sous-jacente que les modèles nanoscopiques peuvent porter à eux seuls l'interprétation et la prévision de réactions (Barlet & Plouin, 1997 ; Loumouamou, 1998 ; chapitres II-2 et III-2 de notre compte-rendu). Nous avons vu

que la mise en œuvre de telles PCK pourrait conduire les étudiants à privilégier une stratégie de mémorisation de réactions génériques et de leurs caractéristiques mécanistiques (chapitre II-2). Les échanges argumentés entre Muriel et Franck ne permettent pas de remettre en cause ces PCK, pas plus que notre artefact : le développement attendu de PCK sur la modélisation et son enseignement s'en trouve donc compromis. D'autres leviers du changement devront être intégrés à l'artefact pour tenter d'y parvenir ; l'étude de la simulation de ce binôme nous en fournit un que nous décrivons un peu plus loin.

De son côté Franck envisage plusieurs pistes en se fixant comme contrainte de trouver des exemples réels de réactions chimiques avec des informations expérimentales et si possible un intérêt industriel. Nous retrouvons cette nécessité chez Danielle qui recherche une synthèse de *« molécule […] culturellement intéressante »* (D188). Si Franck souhaite d'abord faire émerger les éléments théoriques de l'observation des similitudes et des différences entre trois exemples d'hydrolyse basique des esters, il finit par comprendre lors de ses échanges avec Muriel que l'articulation registre empirique et modèles est plus complexe. Il se fixe aussi comme principe de *«leur donner suffisamment de pistes pour qu'ils puissent avancer, sans leur en donner trop pour qu'ils découvrent par eux-mêmes »* (F102). Par exemple il propose d'aborder les mécanismes comme des patchworks à reconstituer (nous retrouvons ici la proposition d'Erdik, 2005). Pour Franck l'appui sur le registre empirique est nécessaire pour éviter de *« déconnecte[r] complètement le tableau blanc du laboratoire »* (F396), et pour offrir une *« crédibilité de l'aspect expérimental »* (F174). Il semble alors s'esquisser chez lui la recherche d'une validité par rapport au registre empirique que nous retrouvons dans l'extrait ci-dessous.

> *F- « Non mais là je ne parle pas du lieu où on met l'exemple, peu importe le lieu où on met l'exemple. Je parle de mettre un exemple… de ne pas créer un exemple. Créer un exemple je trouve ça… »*
> *M- « Enfin disons que tout dépend de l'objectif »*
> *F- « Parce qu'après on ne peut pas dire… Nous on se permet de créer des exemples mais après on va dire à un gamin qu'on ne peut pas lui permettre de créer un nouveau mécanisme en lui disant, comme tu disais tout à l'heure : c'est moins n'importe où, donc il va mettre des moins n'importe où… »*
>
> *Muriel et Franck (annexe, F397-398/M407)*

Muriel n'est en effet pas choquée de travailler *« sur une molécule inventée »* (M501) quand il s'agit de comprendre un mécanisme réactionnel. Ceci est en accord avec son entrée par les modèles nanoscopiques découplée du registre empirique. Cependant les modèles utilisés atteignent leurs limites quand par exemple ils ne fournissent pas d'argument pour justifier la présence d'un intermédiaire réactionnel dans le mécanisme de l'hydrolyse basique des esters. Contrairement aux carbocations ou aux carbanions cet

intermédiaire n'a *« pas d'anomalie particulière »* (M208) à montrer aux étudiants, ce qui contraint Muriel à user d'un argument d'autorité.

> *M- « Oui c'est pour ça on disait que ce n'est pas forcément évident de leur faire trouver pourquoi ce n'est qu'un intermédiaire… A la base les moins sont sur les électronégatifs, les carbones ont leur octet… »*
> *A- « Après il y a peut-être d'autres critères, comment vous faites pour leur justifier l'intermédiaire tétraédrique ? »*
> *M- « Moi je ne leur justifie pas, je sais qu'il existe, je sais que ça passe par là. (rires) »*
>
> *Échange avec Muriel (annexe, M491-492/A66)*

En cela notre proposition d'utiliser l'expérience historique de marquage isotopique pour valider l'existence d'un intermédiaire n'a pas eu d'effet. Muriel y fait référence lors d'un échange entre nous mais sa potentielle intégration à une séquence d'enseignement n'apparaît nulle part pas dans la simulation.

4.2.2. Deux visions différentes des étudiants

Plusieurs échanges entre Muriel et Franck font intervenir leur vision divergente des étudiants. Nous en reproduisons un ci-dessous.

> *M- « Parce qu'on… Enfin je veux dire… Il y a quand même beaucoup d'élèves qui recherchent le par cœur. »*
> *F- « Parce que c'est leur… Je pense que c'est par dernier recours. »*
> *M- « Ils recherchent le par cœur parce que c'est plus facile, parce qu'une fois qu'on sait on recrache. Et puis le problème c'est qu'en chimie organique ça ne marche pas toujours comme ça. Du coup quand ils recrachent du par cœur, et bien neuf fois sur dix ça ne marche pas. »*
> *F- « Je pense que si un élève comprend, il n'aura pas à aller apprendre par cœur. »*
> *M- « Non mais ça je suis tout à fait d'accord. »*
> *F- « Le par cœur c'est le dernier recours. »*
> *M- « Je suis tout à fait d'accord que s'il comprend… Mais je ne suis pas sûre que tous aient l'envie de comprendre. »*
> *F- « Mais là il faut les forcer… »*
> *[…]*
> *M- « Je ne suis pas sûre que les étudiants que j'ai, aient la motivation de comprendre comment ça se passe. Eux ils ont la motivation d'être capable de me reproduire sur un exercice ce qu'on a fait en cours mais pour me faire plaisir. Honnêtement je n'ai pas l'impression que ça les… »*
>
> *Muriel et Franck (annexe, M224-227, 231 / F222-225)*

Muriel interprète ce qu'elle a pu observer chez ses étudiants par leur recherche du par cœur, leur manque de motivation et d'envie de comprendre, ou encore par *« le problème de leur implication »* (M561) et leur manque de *« curiosité »* (M564). Franck essaie de comprendre d'où peuvent provenir de tels comportements : pour lui la mémorisation seule n'est que le dernier recours en l'absence de compréhension efficace et *« il faut les forcer »*

(F225). Il fait référence plus tard au résultat positif d'une activité pédagogique qu'il a mise en place dans un autre cours ; cependant il n'a pas eu l'occasion de tester ce genre d'activités en cours de chimie organique et il ne sait pas si son expérience acquise ailleurs est transférable à cet enseignement.

> *F- « Mais eux ils ont fait leur poster, ils ont présenté aux autres après et ça a bien marché. »*
> *M- « Hmm »*
> *F- « Mais bon après si tu fais ça tout le temps peut-être qu'au bout d'un moment ils se lassent… Mais bon pour l'orga moi le problème est que je n'ai pas l'opportunité de le tester… C'est pour ça en fait que je ne sais pas. »*
>
> *Muriel et Franck (annexe, F569-570, M574)*

Plusieurs fois Franck mentionne son manque de *« séances pratiquées »* (F556) et de recul sur les réactions des étudiants en chimie organique. Il aimerait savoir *« comment ils réagissent quand on leur donne des molécules comme ça »* (F295) dans l'approche prédictive proposée par Muriel, *« quels seraient les endroits où ils bloqueraient, quels seraient les endroits qu'ils comprendraient vite »* (F299). C'est pourquoi Franck cède plusieurs fois face à Muriel qui a l'expérience des étudiants en chimie organique, même s'il n'est pas toujours convaincu par l'interprétation qu'elle fait. L'absence des réactions des étudiants constitue pour lui un manque dans l'artefact. Pour Danielle aussi il est nécessaire de retourner vers les étudiants pour essayer.

Comme nous l'avions envisagé lors de la conception de l'artefact (chapitre IV-2) il faudra donc intégrer nombre d'informations tirées de l'activité des étudiants sur des tâches de chimie organique (classiques ou innovantes). Elles permettraient à des enseignants tels que Franck qui n'ont pas eu l'occasion de beaucoup enseigner la chimie organique, de comprendre les tenants et les aboutissants de cet enseignement et de développer des PCK. Le recours à de telles informations pourrait aussi constituer un levier pour convaincre les enseignants chevronnés de l'intérêt de certaines de nos propositions.

4.2.3. Deux lectures différentes des contraintes

Muriel justifie aussi la nécessité de son approche par les contraintes du programme et de l'examen qui imposent par exemple de connaître toutes les réactions. Par conséquent *« quand ils auront changé globalement le programme et la formulation de l'examen on pourra voir autrement. Mais là l'objectif pour le moment c'est quand même de les amener à passer le BTS tel qu'il est. »* (M136). Franck se montre moins contraint par rapport au savoir à enseigner qu'il *« décompose grosso modo en savoirs ou compétences qu'il y a dans le programme »* (F51). Pour lui *« le programme ce n'est pas une structure à suivre, ce sont des*

contenus à aborder » (F247), l'enseignant pouvant bien les traiter comme il le veut du moment qu'ils sont traités. Nous retrouvons ici l'expression de la liberté pédagogique inscrite dans le programme de chimie organique du BTS Chimiste. Mais cette liberté pédagogique est probablement limitée en raison du maillage entre tâches – stratégies – structuration du contenu (chapitre II-2).

Muriel *« ne pense pas qu['on] puisse changer un truc tout seul dans [s]on coin en regardant comment ça se passe »* (M247). Si les contraintes du programme et de l'examen sont fortes, il s'agit sans doute surtout de l'expression d'un genre professionnel qui touche tous les aspects de cet enseignement. En effet plusieurs éléments indiquent que Muriel a le sentiment d'appartenir à une communauté dont elle partage les pratiques, les préoccupations et les interrogations (Goigoux, 2007). Les trois extraits ci-dessous l'illustrent (nous avons souligné les termes montrant explicitement cette appartenance à la communauté).

> *« Oui tout a fait. Je l'ai vécu comme tout prof qui a au premier semestre, quand c'est la partie descriptive, 10 ou 12 de moyenne, et quand tu commences à foncer sur les alcènes et les mécanismes et écrivez-moi ce que ça va donner, on se retrouve avec 7 tout d'un coup… (rires) […] Pour la plupart ils finissent par comprendre… mais il y en a certains qui sont complètement réfractaires effectivement, et faire une démarche personnelle qui permet de comprendre cette construction des flèches et… ça peut effectivement les aider. »*
>
> *Muriel (annexe, M533-534)*

> *« C'est le drame de tout prof d'orga qui (rires) va se dire en début d'année : j'ai une bonne promo, ça marche bien, c'est sympa… Et puis, une flèche de mécanisme et… ah mon Dieu, plus personne. »*
>
> *Muriel (annexe, M552)*

> *F- « Bon et bien on va regarder dans les bouquins du coup. »*
> *[…]*
> *F- « Mais il le donne en fait. »*
> *M- « Qu'est-ce qu'il donne ? »*
> *F- « Et bien les mécanismes »*
> *M- « Oui. »*
> *F- « (inaudible) Substitutions nucléophiles, tu vois, il les donne directement. »*
> *M- « Il le donne mais le problème c'est qu'actuellement nous dans l'enseignement on a tendance aussi à les donner. »*
>
> *Muriel et Franck (annexe, F362-369 / M376-378)*

Ce dernier extrait illustre aussi le problème qu'a rencontré Franck lors de sa recherche d'exemples réels avec des données expérimentales pour introduire les mécanismes réactionnels. Notre approche des mécanismes selon une démarche de modélisation ne

semble pas compatible avec l'approche portée par la plupart des livres existant en chimie organique (Loumouamou, 1998). Ces livres participent vraisemblablement à la stabilité du genre professionnel actuellement en place.

> *« C'est quand tu réfléchis sous cet angle de vue là, c'est là que tu te rends compte que les bouquins ne servent à rien parce qu'ils sont tous à l'envers donc… Il faut partir de zéro en fait. Ils sont tous faits dans l'autre sens, ils sont tous faits dans le sens : je donne comment c'est et après vous réécrivez. […] Ils sont tous faits comme ça, même le Brückner. »*
>
> *Franck (annexe, F431-432)*

Si Franck affichait dès le début que pour lui *« tout est réalisable, n'importe quelle approche»* (F164), il se rend finalement compte qu'il lui manque des ressources. Par conséquent la réactiothèque serait d'après lui un support utile pour introduire aussi les mécanismes réactionnels en classe.

5. Conclusion : quelques conséquences pour la conception du prochain artefact

La partie IV est pour nous une étape de la conception continuée dans l'usage d'un artefact didactique à destination des enseignants de chimie organique. C'est pourquoi les résultats obtenus jusqu'à présent sont autant d'informations utiles pour la conception de la deuxième version de l'artefact.

Il apparaît que l'argumentaire initial et les bulles d'information à destination des enseignants ont dans l'ensemble atteint leurs objectifs. L'argumentaire pourrait être enrichi, en particulier avec des informations complémentaires provenant de l'activité des étudiants.

La progression proposée a soulevé des questionnements et n'a convaincu que partiellement. Le principal écueil est la déstabilisation des enseignants par notre affichage des réactions comme objectifs secondaires d'apprentissages. Nous prenons en compte la nécessité de situer précisément les approfondissements de spectroscopie, d'éviter un affichage trop tardif de la stéréochimie ou d'éviter l'apparence trop théorique de la partie 5 (aspects thermodynamiques et cinétiques). Les enseignants devraient pouvoir se faire une meilleure représentation de la progression envisagée si nous y adjoignons un chiffrage horaire indicatif et une répartition par année universitaire (approche en spirale), ainsi qu'en délimitant plus précisément encore les contenus à aborder. Nous envisageons donc de continuer à travailler la progression afin d'en améliorer le maillage conceptuel et sa cohérence interne. Cependant la contrainte institutionnelle est forte (programmes, nature

des tâches d'évaluation dans les examens et concours) et nous nous demandons jusqu'où il est possible d'aller en conciliant les exigences respectives de ces deux approches.

L'introduction de la synthèse organique comme un objet d'enseignement en tant que tel, les deux exemples de séquences abordant ce thème, l'utilisation explicite d'un code de schématisation, l'utilisation de critères simples pour valider des synthèses organiques ou encore l'utilisation de la réactiothèque, ont reçu un accueil plutôt favorable. Par exemple Gaëlle et Hélène ont intégré et adapté la réactiothèque en la considérant notamment comme un moyen de gérer les réactions exotiques ou celles ne pouvant pas être étudiées d'un point de vue mécanistique. Cependant l'utilisation d'une synthèse telle que celle de la juvabione effraie par la présence de molécules compliquées et d'informations délicates à interpréter (solvants, etc.). Nous envisageons de chercher d'autres exemples de synthèses organiques réels et utilisables, mais nous prévoyons d'insister aussi sur la distinction nécessaire entre difficulté de la compréhension mécanistique d'une synthèse et difficulté d'une tâche portant sur d'autres aspects.

L'approche mécanistique a provoqué de l'intérêt mais aussi des difficultés sur la mise en œuvre. Les enseignants ont apprécié de pouvoir envisager de réelles tâches de prévision de réaction, de pouvoir faire valider les propositions d'étudiants en fonction de critères et de connaissances disponibles, ou encore de pouvoir montrer les démarches des chercheurs. Le choix à faire parmi plusieurs mécanismes, le formalisme D/A, les notions de donneur/accepteur et le critère du ΔpKa ont aussi suscité l'intérêt. Ce dernier critère doit être travaillé et développé notamment par rapport à son domaine de validité, afin qu'il trouve sa place aux côtés des arguments moléculaires. Le document décrivant la première expérience de marquage isotopique doit être transformé. Quant à la seconde expérience de marquage il faudra déterminer si elle a encore sa place dans la nouvelle structure. L'utilisation des résultats expérimentaux est bien perçue mais il ne faut pas tomber dans l'excès avec des données secondaires qui parasitent l'objectif principal. La notion de site réactif et la classification des transformations devront être retravaillées. Nous devons aussi convaincre les enseignants de l'intérêt de la définition de l'objet d'étude (l'espèce chimique principale). L'intégration de la flèche courbe doit être aussi repensée. Notons qu'une remarque de Noël nous conduit à mieux démarquer les différents niveaux et les formalismes en n'utilisant dorénavant le signé égal que pour l'équation de réaction, la flèche simple dans le schéma de synthèse puisqu'il s'agit d'une transformation chronologique, et enfin les deux flèches tête-bêche pour chaque étape micro-réversible du mécanisme réactionnel.

Enfin en ce qui concerne l'artefact dans son ensemble, les enseignants réclament d'autres exemples de tâches pour les étudiants, d'autres exemples de séquences, d'autres données expérimentales et d'autres exemples de synthèse organique. Noël suggère l'idée de concevoir un livre de chimie organique selon cette approche. Cela est cohérent avec notre approche qui touche deux années d'enseignement et la nécessité de fournir un artefact le plus précisément décrit possible (Courally, 2007). La forme et la lisibilité devront être améliorées. Par exemple Danielle n'apprécie pas d'avoir les réponses aussitôt derrière les questions, ou Cathy a du mal à retrouver les documents. Il sera sans doute nécessaire d'étudier les résultats d'auteurs sur la conception de manuels scolaires. Enfin des informations provenant de l'activité d'étudiants sont nécessaires à tous les niveaux de l'artefact.

Conclusions et perspectives

Notre travail a porté sur l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique des deux premières années de l'enseignement supérieur, selon une double approche : d'une part nous avons analysé le savoir à enseigner actuel avant de proposer pour les étudiants des activités qui se rapprocheraient des pratiques du chimiste organicien (modélisation de la matière et de ses transformations, stratégie de synthèse de molécules organiques) et une restructuration globale du contenu ; d'autre part nous avons intégré les enseignants au processus de conception d'un instrument didactique visant à leur fournir des ressources nécessaires à la transformation du contenu disciplinaire.

Nous avons tout d'abord réalisé une analyse du savoir à enseigner afin de déterminer si les étudiants pouvaient mettre en œuvre une stratégie de modélisation plutôt qu'une stratégie de mémorisation-restitution lors de tâches de chimie organique. Nous avons montré que les caractéristiques (buts / conditions de réalisation) des tâches soumises aux étudiants dans les énoncés d'examens et de concours ne permettaient pas la réalisation des tâches selon une stratégie de modélisation, mais qu'elles pouvaient l'être selon une stratégie de mémorisation-restitution. En effet les données fournies dans les énoncés d'examen et de concours concernaient essentiellement la structure des espèces chimiques, et très majoritairement celle des réactifs ; les donnés cinétiques et thermodynamiques étaient peu présentes et les données quantiques étaient totalement inexistantes. Or d'après l'analyse effectuée au regard du savoir de référence, ces données sont nécessaires pour pouvoir faire fonctionner les modèles de la réactivité en chimique organique. Nous avons aussi montré la place importante des tâches dans le sens direct (ou s'y ramenant) dont le but vise notamment la détermination du produit final. Or de telles tâches se rapprochent de tâches de prévision qui sont quasiment impossibles à réaliser à partir de la seule connaissance des conditions initiales. Par contre la reconnaissance de caractéristiques structurelles clés (fonction, stéréochimie…) des espèces chimiques de l'énoncé est suffisante pour restituer une réactivité spécifique à une famille de molécules (fonction), une équation de réaction générique ou un mécanisme réactionnel générique préalablement mémorisés.

En outre nous avons montré que la structuration par fonction, omniprésente dans les livres et les programmes d'enseignement jusqu'à bac+2, était adaptée à ces tâches et aux stratégies de mémorisation-restitution. Face à un problème de chimie organique les étudiants n'auraient qu'à reconnaître une fonction et aller chercher dans leur mémoire le chapitre concernant cette fonction, associé à une liste d'équations de réactions et de

mécanismes réactionnels génériques. Cependant la structuration par fonction n'est pas progressive par rapport aux modèles car elle implique une introduction simultanée de modèles et de données de natures différentes (cinétique, thermodynamique, moléculaire, etc.) pour pouvoir traiter la réactivité des premières familles étudiées, comme celle des alcènes.

Les analyses précédentes nous ont conduit à faire des propositions pour améliorer cet enseignement-apprentissage jusqu'à bac+2 : restructurer globalement le contenu en mettant l'accent sur les questions du chimiste organicien et en proposant une progressivité dans les réponses et la modélisation, favoriser la stratégie de modélisation en proposant des tâches (buts / conditions de réalisation) adaptées et en rendant plus opératoires les modèles enseignés (critère du ΔpKa, etc.), diversifier les tâches de synthèse organique dès les premières années de chimie organique en réduisant le nombre de réactions à connaître et en utilisant en classe une base de données (la « réactiothèque »). Dans la « réactiothèque » sont regroupées des transformations d'espèces chimiques contextualisées (avec référence de la publication de recherche, rendements, etc.) qui pourraient être transposées par les étudiants à d'autres situations expérimentales et d'autres problèmes. Les réactions et leurs caractéristiques perdraient alors leur statut d'objet d'enseignement principal et ce changement d'optique dans l'enseignement permettrait de mettre en avant d'autres aspects de la chimie organique (modélisation, démarches de synthèse organique).

Nous avons réalisé une étude exploratoire de l'activité des enseignants par rapport à la structuration globale des contenus, l'enseignement de la synthèse organique et l'enseignement des modèles et des mécanismes réactionnels. Nous avons cherché à les interpréter en combinant une approche ergonomique et une approche didactique en termes de PCK. Cela nous a permis d'envisager que les enseignants construisaient dans la pratique de cet enseignement une structure conceptuelle logique et des PCK en accord avec le contenu des programmes, le contenu de la majorité des livres de chimie organique disponibles et les pratiques partagées par la communauté des enseignants de chimie organique. Plus particulièrement nous avons montré que les enseignants privilégiaient la structuration par fonction, proposaient des activités de synthèse organique sur le tas et enseignaient les mécanismes réactionnels et les modèles par une présentation magistrale et non par des activités d'élaboration de mécanismes par les étudiants. Il nous est apparu nécessaire de favoriser la construction de PCK relatives à la modélisation et la synthèse organique dès la première année. En outre des enseignants ont montré des difficultés à valider des productions d'étudiants (synthèse organique, mécanisme réactionnels) en se référant à un savoir inaccessible au lieu d'un ensemble de connaissances, critères et

données pertinents et partagés par la classe : des PCK relatives à la gestion des phases de conclusion étaient donc nécessaires. Des travaux plus récents renforcent les résultats obtenus dans cette partie de notre thèse (Farré & Lorenzo, 2009 ; Lorenzo *et al.*, 2009).

Les deux précédentes études ont constitué des analyses préalables à la conception d'un artefact didactique pour aider les enseignants à développer leur activité. Nous avons conçu une première version de l'artefact en conciliant les cadres de la construction didactique et de l'activité instrumentée des enseignants. Si son principal statut était d'être à terme un document ressource à destination des enseignants ou des formateurs, il a surtout été dans un premier temps un outil de recherche visant à obtenir des résultats supplémentaires sur l'activité des enseignants de chimie organique.

L'artefact intégrait en particulier : un argumentaire initial visant à faire réfléchir les enseignants sur leurs pratiques et à augmenter leur intérêt pour nos propositions, une proposition de structuration des contenus autour des questions du chimiste organicien et selon une progressivité en termes de modélisation, des exemples de séquences sur la synthèse organique dès la première année associés à l'introduction de la « réactiothèque », des exemples de séquences sur l'élaboration d'un mécanisme réactionnel et de modèles de la réactivité pour prévoir d'autres réactions.

L'artefact a reçu un accueil inégal : intéressant mais difficile à mettre en œuvre. Malgré cela les séquences de synthèse organique et la réactiothèque ont été assez facilement intégrées dans l'activité d'enseignants. Par contre la structuration proposée et les séquences sur les mécanismes réactionnels ont posé plus de problèmes. Par exemple le changement de statut des réactions vers des objets secondaires d'apprentissage a perturbé les enseignants. Les enseignants ont apprécié de pouvoir envisager de réelles tâches de prévision de réaction, de pouvoir valider les propositions d'étudiants en fonction de critères et de connaissances disponibles, ou encore de pouvoir montrer les démarches des chercheurs. Les notions de donneur/accepteur et le critère du Δpka ont eux-aussi suscité de l'intérêt. Cependant les définitions du « réactif principal », la classification des transformations (addition, etc.), la place de l'introduction des flèches courbes et plus généralement la manière d'aborder les premiers éléments de la réactivité utiles à l'interprétation des mécanismes réactionnels ont rencontré des difficultés.

L'analyse de la genèse instrumentale nous a donc permis d'envisager des améliorations de l'artefact. Il nous a aussi permis d'observer l'amorce du développement de PCK chez les enseignants, malgré un déterminant institutionnel contraignant et l'insuffisance de notre

artefact initial à combler tous les besoins en ressources (pédagogiques, données utiles à la modélisation, etc.) des enseignants.

A l'issue de ce travail plusieurs perspectives de recherches apparaissent.

Lors de notre analyse didactique nous n'avons pas considéré directement l'activité des étudiants. Nous considérions les étudiants à travers le filtre des enseignants ou des résultats d'autres recherches en didactique. Il nous paraît incontournable à l'avenir d'analyser l'activité des étudiants sur des tâches que nous proposons afin d'obtenir davantage de connaissances sur l'apprentissage en chimie organique et de constituer un recueil d'informations sur les étudiants utilisables avec les enseignants en vue de développer des PCK et enrichir le genre professionnel.

Des analyses en classe pourraient permettre aussi de repérer ce qui manque dans les modèles, les définitions ou les critères utilisés et qui oblige l'enseignant à utiliser des arguments d'autorité. Ainsi pourraient être construites et introduites de nouvelles connaissances permettant aux étudiants de valider par eux-mêmes leurs productions en réponse à une tâche. Enfin à l'image du critère du ΔpKa, d'autres critères ou modèles opérationnels pourraient être recherchés dans des logiciels de simulation (conception de synthèses, etc.) utilisés par les chercheurs afin de pouvoir ensuite les transposer à l'enseignement.

Quant à notre artefact didactique, la partie IV de notre thèse ne représentait que le début du processus de conception continuée dans l'usage. Ce processus devrait être poursuivi en produisant un second artefact grâce à nos résultats et à nos conclusions. Il s'agirait en particulier d'améliorer les séquences existantes et d'en proposer de nouvelles, optimiser la présentation et le degré de précision des séquences et de la progression afin qu'elles soient plus accessibles aux enseignants, terminer la réactiothèque, etc. Ce nouvel artefact pourra être soumis à son tour à une genèse instrumentale afin d'en évaluer les effets sur l'activité instrumentée des enseignants et sur l'artefact. Notre analyse de l'activité instrumentée en lien avec le premier artefact était fondée sur une simulation de préparation de cours, il serait utile d'apporter des éclairages complémentaires lors de l'analyse de la genèse instrumentale liée au deuxième artefact, en se focalisant sur des observations en classe. La conception continuée dans l'usage est un processus cyclique, par améliorations successives, qui pourrait conduire ensuite à la diffusion de l'artefact et son utilisation par la communauté des enseignants de chimie organique, comme outil de formation d'enseignants ou outil d'enseignement. Il constituerait ainsi un levier d'action sur le genre professionnel.

Enfin nous nous étions fixé comme contrainte de proposer une restructuration de cet enseignement tout en conservant le mieux possible le matériau constituant les programmes d'enseignement actuels. Quant à la contrainte des examens, il s'agissait de faire au moins aussi bien que l'actuel enseignement malgré le risque d'être décalé par rapport aux tâches d'évaluation. Mais jusqu'où pouvons-nous aller dans cette démarche ? Le processus engagé ne peut pas converger vers un instrument idéal et généralisable indépendamment du contexte. Il sera nécessaire d'évaluer plus précisément les éléments du contexte que nous considérons comme fixes et ceux que nous pouvons espérer faire changer dans l'environnement immédiat des enseignants de chimie organique ou dans une moindre mesure, au niveau des concepteurs des programmes d'enseignement et des examens ou concours.

Références bibliographiques

Agrebi, S. (2004). De la représentation symbolique au langage lors de l'apprentissage des mécanismes en chimie organique dans l'enseignement supérieur. Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon 2 - Université de Tunis, Lyon - Tunis.

Agrebi, S. & Le Maréchal, J.-F. (2001). Used of curved arrows to represent organic reaction mechanisms: a let without saying fundamental knowledge. ESERA. Thessaloniki (Greece).

Akeroyd, F. M. (2000). "Why was a fuzzy model so successful in physical organic chemistry ?" HYLE - International Journal for Philosophy of Chemistry **6**(2): 161-173.

Almeida, C. A. & Liotta, L. J. (2005). "Organic chemistry of the cell: an interdisciplinary approach to learning with a focus on reading, analyzing, and critiquing primary literature." Journal of Chemical Education **82**(12): 1794-1799.

Amigoni, S., Fensterbank, H. & Gaucher, A. (2004). Chimie organique : cours. Paris, Belin.

Anderson, T. L. & Bodner, G. M. (2008). "What can we do about 'Parker'? A case study of a good student who didn't 'get' organic chemistry." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 93-101.

Anslyn, E. V. & Dougherty, D. A. (2006). Modern Physical Organic Chemistry. Sausalito, California, University Science.

Arnaud, C. (1998). Exercices corrigés de synthèse organique. *2e.* Paris, Masson.

Arnaud, P. (1971). "Pourquoi des flèches ? Fondement et utilité des mécanismes réactionnels en chimie organique." Unichimie **3**: 5-11.

Arnaud, P., Jamart, B., Bodiguel, J. & Brosse, N. (2004). Chimie organique. *17e éd. revue et augmentée.* Paris, Dunod.

Arsac, G. & Tiberghien, A. (1991). Analyse des contraintes sur un contenu d'enseignement élaboré dans le cadre de la recherche en didactique. Actes du Premier Séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques. Grenoble.

Artigue, M. (1988). "Ingénierie didactique." Recherches en Didactique des Mathématiques **9**(3): 281-308.

Autain Kermen, I. (2007). Prévoir et expliquer l'évolution des systèmes chimiques. Observation de la mise en place d'un nouveau programme de chimie en terminale S : réactions des enseignants et des élèves face à l'introduction de l'évolution des systèmes chimiques. Thèse de doctorat. Université Diderot Paris 7, Paris.

Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre and M. Thellier. Elaboration et justification des modèles. Paris, Maloine**:** 3-19.

Barlet, R., Alagui, A., Otmane, B. & Mahrouz, M. (1999). "Un exemple de la transposition didactique en chimie organique dans l'enseignement expérimental. Etude critique de la régiosélectivité de l'addition de HBr aux alcènes dissymétriques." L'Actualité Chimique: 26-29.

Barlet, R. & Plouin, D. (1997). "La dualité microscopique-macroscopique. Un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire." ASTER **25**: 143-174.

Bécu-Robinault, K. (2007). "Connaissances mobilisées pour préparer un cours de sciences physiques." ASTER **45**: 165-188.

Béguin, P. (2005). Concevoir pour les genèses professionnelles. In P. Rabardel and P. Pastré. Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement. Toulouse, Octares Editions**:** 31-52.

Bhattacharyya, G. (2008). "Who am I? What am I doing here? Professional identity and the epistemic development of organic chemists." Chemistry Education: Research and Practice **9**(2): 84-92.

Bhattacharyya, G. & Bodner, G. M. (2005). ""It gets me to the product": how students propose organic mechanisms." Journal of Chemical Education **82**(9): 1402-1407.

Black, A. E. & Deci, E. L. (2000). "The effects of instructors' autonomy support and students' autonomous motivation on learning organic chemistry: a self-determination theory perspective." Science Education **84**(6): 740-756.

Black, K. A. (1993). "What to do when you stop lecturing. Become a guide and a resource." Journal of Chemical Education **70**(2): 140-144.

Bodner, G. M. & Weaver, G. (2008). "Research and practice in chemical education in advanced courses." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 81-83.

Bowen, C. W. (1990). "Representational systems used by graduate students while problem solving in organic synthesis." Journal of Research in Science Teaching **27**(4): 351-370.

Bradley, A. Z., Ulrich, S. M., Jones Jr., M. & Jones, S. M. (2002). "Teaching the somophore organic course without a lecture. Are you crazy ?" Journal of Chemical Education **79**(4): 514-519.

Brousseau, G. (1980). "L'échec et le contrat." Recherches **41**: 177-182.

Brousseau, G. (1998). Théorie des situations didactiques. Grenoble, La pensée Sauvage.

Browne, L. M. & Blackburn, E. V. (1999). "Teaching introductory organic chemistry: a problem-solving and collaborative-learning approach." Journal of Chemical Education **76**(8): 1104-1107.

Bucat, R. (2004). "Pedagogical Content Knowledge as a way forward: applied research in chemistry education." Chemistry Education: Research and Practice **5**(3): 215-228.

Carey, F. A. & Sundberg, R. J. (1996). Chimie organique avancée. Tome 1 : structure moléculaire et mécanismes réactionnels. Paris - Bruxelles, De Boeck Université.

Carey, F. A. & Sundberg, R. J. (1997). Chimie organique avancée. Tome 2 : réactions et synthèses. Paris - Bruxelles, De Boeck Université.

Chamala, R. R., Ciochina, R., Grossman, R. B., Finkel, R. A., Kannan, S. & Ramachandran, P. (2006). "EPOCH: An organic chemistry homework programm that offers responce-specific feedback to students." Journal of Chemical Education **83**(1): 164-169.

Chevallard, Y. (1986). "Les programmes et la transposition didactique. Illusions, contraintes et possibles." Bulletin de l'APMEP **352**: 32-50.

Clayden, J., Greeves, N., Warren, S. & Wothers, P. (2003). Chimie Organique. Paris-Bruxelles, De Boeck.

Clot, Y. (1999). La fonction psychologique du travail. *2006, 5e ed.* Paris, Presses Universitaires de France.

Clot, Y. & Faïta, D. (2000). "Genres et styles en analyse du travail. Concepts et méthodes." Travailler **4**: 7-42.

Compain, P. (2003). "Le pari de la simplexité. Le simple et le complexe en synthèse organique." L'Actualité Chimique **263-264**: 129-134.

Cooley, J. H. (1991). "A problem-solving approach to teaching organic laboratory." Journal of Chemical Education **68**(6): 503-504.

Corey, E. J. & Cheng, X.-M. (1989). The logic of chemical synthesis. John Wiley & Sons Inc

Correia, J. (1988). "On the boiling points of the alkyl halides." Journal of Chemical Education **65**(1): 62-64.

Couchouron, M., Viennot, L. & Courdille, J.-M. (1996). "Les habitudes des enseignants et les intentions didactiques des nouveaux programmes d'électricité en classe de quatrième." Didaskalia **8**: 81-96.

Courally, S. (2007). Concevoir un instrument didactique pour l'enseignement du français langue de scolarisation. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Cracolice, M. S., Deming, J. C. & Ehlert, B. (2008). "Concept learning versus problem solving: a cognitive difference." Journal of Chemical Education **85**(6): 873-878.

David, S. (2004). "La théorie de la mésomérie telle quon l'enseigne. Vers une "révision déchirante"." L'Actualité Chimique **275**: 29-32.

De Jesus, K. (1995). "A problem-based approach to organic chemistry." Journal of Chemical Education **72**(3): 224-226.

De Jong, O. (1998). "Points de vue de professeurs et de futurs professeurs concernant l'enseignement de la combustion." ASTER **26**: 183-205.

De Jong, O. (2003). Exploring science teachers' pedagogical content knowledge. In D. Psillos and al. Science Education Research in the Knowledge-Based Society. Netherlands, Kluwer Academic Publishers**:** 373-381.

Depovere, P. (2005). Chimie organique. *2e éd.*, De Boeck.

Descodts, G. (1994). Les bases de la chimie organique : Cours et exercices corrigés. *2e éd.*, Flammarion Médecine-Sciences.

Domin, D. S., Al-Masum, M. & Mensah, J. (2008). "Students' categorizations of organic compounds." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 114-121.

Drouin, J., Ed. (1999). Manipulations commentées de chimie organique. Paris, Bruxelles, De Boeck Université.

Drouin, J. (2005). Introduction à la chimie organique. Corbas, Librairies du CEDRE.

Duit, R. (2007). "Science Education Research Internationally: Conceptions, Research Methods, Domains of Research." Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education **3**(1): 3-15.

Duit, R., Gropengieβer, H. & Kattmann, U. (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction. In H. E. Fischer. Developping Standards in Research on Science Education, the ESERA Summer School 2004. London, Taylor & Francis Group**:** 1-9.

Dumon, A. (2005). La chimie et les modèles. Communication personnelle.

Durupthy, A., Ed. (1997). Chimie Organique : 2de année PC-PC*. HPrépa. Paris, Hachette.

Durupthy, A., Ed. (2003). Chimie 1ère année PCSI. Volume 1, 1ère période. HPrépa. Paris, Hachette.

Ellis, J. W. (1994). "The forum: how are we going to teach organic if the task force has its away? Some observations of an organic professor." Journal of Chemical Education **71**(5): 399-403.

Erdik, E. (2005). "Using building-block puzzles to practice drawing organic mechanisms." Journal of Chemical Education **82**(9): 1325-1326.

Esteb, J. J., Magers, J. R., McNulty, L. & Wilson, A. M. (2006). "Projetcs that assist with content in a traditional organic chemistry course." Journal of Chemical Education **83**(12): 1807-1808.

Farré, A. S. & Lorenzo, M. G. (2009). "Another piece of the puzzle: the relationship between beliefs and practice in higher education organic chemistry." Chemistry Education Research and Practice **10**(176-184).

Ferguson, R. & Bodner, G. M. (2008). "Making sense of the arrow-pushing formalism among chemistry majors enrolled in organic chemistry." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 102-113.

Ficini, J., D'Angelo, J. & Noire, J. (1974). "Stereospecific synthesis of dl-juvabione." Journal of the American Chemical Society **96**(4): 1213-1214.

Folcher, V. & Sander, E. (2005). Usages, appropriation : analyse sémantique a priori et analyse de l'activité instrumentée. In P. Rabardel and P. Pastré. Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement. Toulouse, Octares Editions**:** 129-155.

Forbes, D. C. (2004). "Incorporation of medicinal chemistry into the organic chemistry curriculum." Journal of Chemical Education **81**(7): 975-976.

Friesen, J. B. (2008). "Saying what you mean: Teaching mechanisms in organic chemistry." Journal of Chemical Education **85**(11): 1515-1518.

Gallagher, G. J. & Adams, D. L. (2002). "Introduction to the use of primary chemistry literature in an honors somophore-level organic chemistry course." Journal of Chemical Education **79**(11): 1368-1371.

Garde, I. B. (1987). "An analogy for soluble and insoluble mixtures: sand and magnetic iron filings." Journal of Chemical Education **64**(2): 154-155.

Gerhardt, C. (1845). Précis de chimie organique. Tome second. Paris, Fortin, Masson et Cie.

Gess-Newsome, J. & Lederman, N. G. (1999). Examining Pedagogical Content Knowledge. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Gillespie, R. J. & Matta, C. F. (2001). "Teaching the VSEPR model and electron densities." Chemistry Education: Research and Practice **2**(2): 73-90.

Goigoux, R. (2005). Contribution de la psychologie ergonomique au développement de la didactique du français. In A. Mercier and C. Margolinas. Balises en didactique des mathématiques. Grenoble, La Pensée Sauvage**:** 17-39.

Goigoux, R. (2007). "Un modèle d'analyse de l'activité des enseignants." Education et Didactique **1**(3): 19-41.

Goldish, D. M. (1988). "Let's talk about the organic chemistry course." Journal of Chemical Education **65**(7): 603-604.

Gravert, D. J. (2006). "Two-cycle organic chemistry and the student-designed research lab." Journal of Chemical Education **83**(6): 898-901.

Grécias, P. (2004). Chimie organique : cours et exercices. *3e édition.* Tec & Doc Lavoisier.

Green, G. & Rollnick, M. (2006). "The role of structure of the discipline in improving student understanding: the case of organic chemistry." Journal of Chemical Education **83**(9): 1376-1381.

Grossman, R. B. (2008). The art of writing reasonable organic reaction mechanisms. *2nd.* Springer.

Grove, N. P., Hershberger, J. W. & Bretz, S. L. (2008). "Impact of a spiral organic curriculum on student attrition and learning." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 157-162.

Hagen, J. P. (1988). "Flow charting leaving group reactions." Journal of Chemical Education **65**(7): 620.

Hagen, J. P. (2000). "Cooperative learning in organic II. Increased retention on a commuter campus." Journal of Chemical Education **77**(11): 1441-1444.

Hart, H. & Conia, J.-M. (1997). Introduction à la chimie organique. *Nouvelle présentation.* Dunod.

Hassan, A. K., Hill, R. A. & Reid, N. (2004). "Ideas underpinning success in an introductory course in organic chemistry." University Chemistry Education **8**(2): 40-51.

Heeren, J. K. (1990). "Teaching chemistry by the socratic method." Journal of Chemical Education **67**(4): 330-331.

Henderleiter, J., Smart, R., Anderson, J. & Elian, O. (2001). "How do organic chemistry students understand and apply hydrogen bonding?" Journal of Chemical Education **78**(8): 1126-1130.

Hervas, M. & Silverman, L. P. (1991). "A magnetic illustration of the VSEPR theory." Journal of Chemical Education **68**(10): 861-862.

Hirn-Chaine, C. (1998). Transformations d'intentions didactiques par les enseignants : le cas de l'optique élémentaire en classe de quatrième. Thèse de doctorat. Université Diderot-Paris 7, Paris.

Hodges, L. C. & Harvey, L. C. (2003). "Evaluation of student learning in organic chemistry using the SOLO taxonomy." Journal of Chemical Education **80**(7): 785-787.

Horowitz, G. & Schwartz, G. (2004). "Exploring organic mechanistic puzzles with molecular modeling." Journal of Chemical Education **81**(8): 1136-1139.

Huddle, P. A. (2000). "A poster session in organic chemistry that markedly enhanced student learning." Journal of Chemical Education **77**(9): 1154-1157.

Ilich, P.-P., Rickertsen, L. S. & Becker, E. (2006). "Polar addition to C=C group: Why is anti-Markovnikov hydroboration-oxidation of alkenes not "anti-"?" Journal of Chemical Education **83**(11): 1681-1685.

Isaacs, N. S. (1992). Physical organic chemistry. *2nd ed.* England, Longman Scientific & Technical.

Johnson, A. W. (1990). "The year-long first course in organic chemistry." Journal of Chemical Education **67**(4): 299-303.

Johnson, A. W. (2003). Invitation à la chimie organique. De Boeck.

Johsua, S. & Dupin, J.-J. (1999). Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. *2e éd. corrigée.* Paris, Presses Universitaires de France.

Jones, M. B. (2001). "Molecular modeling in the undergraduate chemistry curriculum." Journal of Chemical Education **78**(7): 867-868.

Jullien, L., Proust, A. & Le Menn, J.-C. (1998). "How does the Gibbs free energy evolve in a system undergoing coupled competitive reactions ?" Journal of Chemical Education **75**(2): 194-199.

Karafiloglou, P. (2002). "Understanding delocalization and hyperconjugaison in terms of (covalent and ionic) resonance structures." Chemistry Education: Research and Practice **3**(2): 119-127.

Kariotoglou, P. & Tselfes, V. (2000). "Science curricula: epistemological, didactical and institutional approach." Physics Review **31**: 19-28 (in Greek).

Karty, J. M., Gooch, G. & Bowman, B. G. (2007). "Teaching a modified Hendrickson, Cram, and Hammond Curriculum in Organic Chemistry." Journal of Chemical Education **84**(7): 1209-1216.

Kerber, R. C. (2002). "Markovnikov's rule in history and pedagogy." Foundations of chemistry **4**: 61-72.

Kermen, I. & Méheut, M. (2009). "Different models used to interpret chemical changes: analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning." Chemistry Education Research and Practice **10**: 24-34.

Kind, V. (2004). Beyond appearances: students' misconceptions about chemical ideas. *2nd.* London, Royal Society of Chemistry.

Kingsbury, C. & Schelble, S. (2001). "Teaching chemistry in the new century: Organic Chemistry." Journal of Chemical Education **78**(9): 1172-1173.

Kingsbury, C. A. (1986). "Report of the symposium on teaching in organic chemistry." Journal of Chemical Education **63**(4): 315-317.

Kjonaas, R. A. (1984). "An analogy for solubility: marbles and magnets." Journal of Chemical Education **61**(9): 765.

Krausz, P., Benhaddou, R. & Granet, R. (1999). Introduction à la chimie organique : cours et exercices corrigés. Dunod.

Lacaze, P.-C., Jouini, M., Lacroix, J.-C. & Randriamahazaka, H. (2006). Manuel de chimie organique. Hermann.

Ladhams Zieba, M. (2004). Teaching and learning about reaction mechanisms in organic chemistry. Thèse de doctorat. University of Western Australia, Perth.

Lalande, J. (1997). Chimie organique : Cours avec exercices résolus. Dunod.

Larcher, C. (1994). Etude comparative de démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation ? In. Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation. Paris, INRP**:** 9-24.

Laszlo, P. (1993). Logique de la synthèse organique. Paris, Ecole Polytechnique - Ellipses.

Laurenço, C. (1998). Synthèse organique et informatique. 8èmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques. Montpellier.

Le Corre, M., Moreau, C. & Payen, J. (2000). Chimie organique. cours et problèmes corrigés. Belin.

Le Goaller, R. & Loumouamou, A. (1997a). "Les statuts du savoir et la transposition didactique en chimie organique. Exemple des additions des halogénures d'hydrogène sur les composés éthyléniques." L'Actualité Chimique **3**: 12-18.

Le Goaller, R. & Loumouamou, A. (1997b). "Les statuts du savoir et la transposition didactique en chimie organique. Exemple des additions des halogénures d'hydrogène sur les composés éthyléniques. II- Les statuts du savoir." L'Actualité Chimique **4**: 18-24.

Le Maréchal, J.-F. (1999). Modelling student's cognitive activity during the resolution of problems based on experimental facts in chemical education. In J. Leach and A. C. Paulsen. Practical Work in Science Education. 195-209.

Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. (1993). Construire des concepts en physique. Paris, Hachette.

Leplat, J. (1992). L'analyse psychologique du travail. In J. Leplat. L'analyse du travail en psychologie ergonomique. *2001, 2nd ed.* Toulouse, Octares Editions. **1:** 23-39.

Leplat, J. (2004). "Eléments pour l'étude des documents prescripteurs." @ctivités **1**(2): 195-216.

Leplat, J. & Hoc, J.-M. (1992). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. In J. Leplat. L'analyse du travail en psychologie ergonomique. *2001, 2nd ed.* Toulouse, Octares Editions. **1:** 47-59.

Libby, R. D. (1991). "Piaget and organic chemistry. The equilibrium-kinetic approach for teaching introductory organic chemistry." Journal of Chemical Education **68**(8): 634-637.

Libby, R. D. (1995). "Piaget and organic chemistry. Teaching introductory organic chemistry through learning cycles." Journal of Chemical Education **72**(7): 626-631.

Lin, K.-C. (1988). "Understanding product optimization. Kinetic versus thermodynamic control." Journal of Chemical Education **65**(10): 857-860.

Lorenzo, M. G., Farré, A. S. & Rossi, A. M. (2009). Teachers' discursive practices in a first organic chemistry course. European Science Education Research Association - ESERA Conference 2009, Istanbul - Turkey.

Loumouamou, A. (1998). Contribution à la transposition didactique en chimie organique. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble.

Magnusson, S., Karjcik, J. & Borko, H. (1999). Nature, sources and development of pedagogical content knowledge for science teaching. In J. Gess-Newsome and N. G. Lederman. Examining Pedagogical Content Knowledge. Dordrecht, Kluwer**:** 95-132.

March, J. (2001). Advanced Organic Chemistry: reactions, mechanisms and structure. *5e éd.*, John Wiley & Sons.

Martinand, J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. In R. M. J. Toussaint. Changement conceptuel et apprentissage des sciences. Recherches et pratiques. Québec, Les éditions logiques**:** 47-68.

Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Chomat, A., Drouin, A.-M., Genzling, J.-C., Larcher, C., Lemeignan, G., Méheut, M., Rumelhard, G. & Weil-Barais, A. (1992). Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences. Paris, INRP.

Mayen, P. & Savoyant, A. (2002). Formation et prescription : une réflexion de didactique professionnelle. In C. Revest and Y. Schwartz. Les évolutions de la prescription - Actes du XXXVIIème congrès de la SELF. Toulouse, Octarès Editions**:** 226-232.

McMurry, J. (2003). Chimie organique : les grands principes. *Nouvelle présentation.* Dunod.

Méheut, M. (2006). Recherches en didactique et formation des enseignants de sciences. In. Rapport Eurydice : L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. Etat des lieux des politiques et de la recherche. Bruxelles, Direction Générale de l'Education et de la Culture. Commission Européenne**:** 55-76.

Méheut, M. & Psillos, D. (2004). "Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research." International Journal of Science Education **26**(5): 515-535.

Menting, K. H., Eichel, W., Schmand, H. L. K. & Boldt, P. (1983). "Quinones. Part 9. Stability of quinones toward water. Synthesis of a 1,7-naphtoquinone." Journal of Organic Chemistry **48**(17): 2814-2820.

Mercier, J.-P. & Godard, P. (1995). Chimie organique : une initiation. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Mesplède, J. (2004). Chimie organique PC. Bréal.

Milcent, R. (2007). Chimie organique : stéréochimie, entités réactives et réactions. EDP Sciences.

Minter, D. E. & Reinecke, M. G. (1985). "Two-cycle organic chemistry. An alternative to course proliferation." Journal of Chemical Education **62**(1): 77-79.

Morge, L. (2001). "Caractérisation des phases de conclusion dans l'enseignement scientifique." Didaskalia **18**: 99-120.

Morge, L. (2003). "Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire." Didaskalia **23**: 101-131.

Morge, L. (2004). "Etudier l'activité des enseignants et des élèves : questions de méthodes." Revue Française de Pédagogie **147**: 5-14.

Mullins, J. J. (2008). "Six pillars of organic chemistry." Journal of Chemical Education **85**(1): 83-87.

Murov, S. (2007). "Reaction-map of organic chemistry." Journal of Chemical Education **84**(7): 1224.

Murphy, P. M. (2007). "Teaching structure-property relationships: investigating molecular structure and boiling point." Journal of Chemical Education **84**(1): 97-101.

Nash, J. G., Liotta, L. J. & Bravaco, R. J. (2000). "Measuring conceptual change in organic chemistry." Journal of Chemical Education **77**(3): 333-337.

Neeland, E. G. (2002). "Of magnets and mechanisms." Journal of Chemical Education **79**(2): 186.

Normant, J. (2003). "La synthèse organique : un art en pleine évolution." L'Actualité Chimique **263-264**: 5-6.

Ourisson, G. (1986). "Le langage universel de la chimie : les idéogrammes. Ambiguïtés et laxismes." L'Actualité Chimique **Janvier-février**: 41-46.

Pekdag, B. & Le Maréchal, J.-F. (2001). Apprentissage comparé de la notion de réaction chimique en TP ou à l'aide d'une vidéo : rôle des observations faites par les élèves. Deuxièmes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST. Carry-le-Rouet.

Penn, J. H. & Al-Shammari, A. G. (2008). "Teaching reaction mechanisms using Curved Arrow Neglect (CAN) Method." Journal of Chemical Education **85**(9): 1291-1295.

Penn, J. H. & Nedeff, V. M. (2000). "Organic chemistry and the Internet: A Web-based approach to homework and testing using the WE_LEARN System." Journal of Chemical Education **77**(2): 227-231.

Pinto, R. (2005). "Introducing curriculum innovations in science: identifying teachers' transformations and the design of related teacher education." Science Education **89**(1): 1-12.

Platt, T., Roth, V. & Kampmeier, J. A. (2008). "Sustaining change in upper level courses: peer-led workshops in organic chemistry and biochemistry." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 144-148.

Pribyl, J. R. & Bodner, G. M. (1987). "Spatial ability and its role in organic chemistry: A study of four organic courses." Journal of Research in Science Teaching **24**(3): 229-240.

Rabardel, P. (1995). Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instruments contemporains. Paris, Armand Colin.

Rabardel, P., Carlin, N., Chesnais, M., Lang, N., Le Joliff, G. & Pascal, M. (2007). Ergonomie. Concepts et méthodes. *5e réimpression.* Toulouse, Octarès Editions.

Rabardel, P. & Pastré, P., Eds. (2005). Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement. Collection travail & activité humaine. Toulouse, Octarès Editions.

Rabasso, N. (2006). Chimie organique. Généralités, études des grandes fonctions et méthodes spectroscopiques., De Boeck.

Raff, L. M. (1974). "Illustration of reaction mechanism in polyatomic systems via computer movies." Journal of Chemical Education **51**(11): 712-716.

Reingold, I. D. (2001). "Bioorganic first: a new model for the college chemistry curriculum." Journal of Chemical Education **78**(7): 869-871.

Robardet, G. & Guillaud, J.-C. (1997). Eléments de didactique des sciences physiques. Paris, Presses Universitaires de France.

Rushton, G. T., Hardy, R. C., Gwaltney, K. P. & Lewis, S. E. (2008). "Alternative conceptions of organic chemistry topics among fourth year chemistry students." Chemistry Education Research and Practice **9**(2): 122-130.

Salatin, T. D. & Jorgensen, W. L. (1980). "Computer-assisted mechanistic evaluation of organic reactions. 1. Overview." Journal of Organic Chemistry **45**(11): 2043-2051.

Sartoris, N. E. (1992). "Two-cycle organic chemistry. A sound pedagogic alternative to the traditional year-long course." Journal of Chemical Education **69**(9): 750-752.

Schearer, W. R. (1988). "Beyond the traditional lecture system of teaching chemistry: organic chemistry." Journal of Chemical Education **65**(2): 133-136.

Schobert, H. H. (1973). "A magnetic analogy for demonstrating some VSEPR principles." Journal of Chemical Education **50**(9): 651-652.

Scudder, P. H. (1992). Electron flow in organic chemistry. John Wiley & Sons.

Scudder, P. H. (1997). "Databas vs. Expert system teaching paradigms: using organic reaction mechanisms to teach chemical intuition." Journal of Chemical Education **74**(7): 777-781.

Shaw, C. F., III & Shaw, B. A. (1991). "A magnetic two-dimensional analogue of VSEPR." Journal of Chemical Education **68**(10): 861.

Shibley Jr., I. A., Milakofsky, L. K. & Nicotera, C. L. (2001). "Incorporating a substantial writing assignment into organic chemistry: library research, peer review, and assessment." Journal of Chemical Education **78**(1): 50-53.

Shulman, L. S. (1987). "Knowledge and teaching: foundations of the new reform." Harvard Educational Review **57**(1): 1-22.

Sinaceur, H. (1999). Modèle. In D. Lecourt. Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences. Paris, Presses Universitaires de France**:** 649-651.

Smith, M. & March, J. (2007). March's Advanced Organic Chemistry: reactions, mechanisms, and structure. *6e éd.*, Wiley-Interscience.

Smith, M. B. (1990). "Disconnect by the numbers. A beginner's guide to synthesis." Journal of Chemical Education **67**(10): 848-856.

Smith, M. B. (1994). Organic synthesis. McGraw-Hill.

Solomonidou, C. & Stavridou, H. (1994). "Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique." ASTER **18**: 75-95.

Solomons, G. & Fryhle, C. (2000). Chimie organique. *Traduction de la 7e éd. de Organic Chemistry.* Dunod.

Sparfel, D. (1992). La rétrosynthèse. Paris, Ellipses Marketing.

Straumanis, A. (2008). Organic chemistry. A guided inquiry. *2e ed.* Boston - New-York, Houghton Mifflin.

Taagepera, M. & Noori, S. (2000). "Mapping students' thinking patterns in learning organic chemistry by the use of knowledge space theory." Journal of Chemical Education **77**(9): 1224-1229.

Teixeira, J. & Holman, R. W. (2008). "A simple assignment that enhances students' ability to solve organic chemistry synthesis problems and understand mechanisms." Journal of Chemical Education **85**(1): 88-89.

Terrien, M. (1998). Contribution à l'étude des échanges entre la recherche et l'enseignement supérieur (chimie). Thèse de doctorat. Université d'Angers, Angers.

Tiberghien, A. (1994). "Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations." Learning and Instruction **4**: 71-87.

Tiberghien, A. & Vince, J. (2005). "Etudes de l'activité des élèves de lycée en situation d'apprentissage de la physique." Cahiers du français contemporain **10**: 153-176.

Tien, L. T., Roth, V. & Kampmeier, J. A. (2002). "Implementation of a peer-led team learning instructional approach in an undergraduate organic chemistry course." Journal of Research in Science Teaching **39**(7): 606-632.

Tonge, K. H. (1988). "Potential energy surfaces." Journal of Chemical Education **65**(1): 65-68.

Trong Anh, N. (1994). Introduction à la chimie moléculaire. Paris, Ellipses.

Troost, L. & Péchard, E. (1910). Traité élémentaire de chimie. *15e éd.* Paris, Masson et Cie.

Tsaparlis, G. & Angelopoulos, V. (2000). "A model of problem solving: its operation, validity, and usefulness in the case of organic-synthesis problems." Science Education **84**(2): 131-153.

Tsaparlis, G. & Zoller, U. (2003). "Evaluation of higher vs. lower-order cognitive skills-type examinations in chemistry: implications for university in-class assessment and examinations." University Chemistry Education **7**: 50-57.

Van Driel, J. H., Verloop, N. & De Vos, W. (1998). "Developing science teachers' Pedagogical Content Knowledge." Journal of Research in Science Teaching **35**(6): 673-695.

Vergnaud, G. (1990). "La théorie des champs conceptuels." Recherches en Didactique des Mathématiques **30**(2.3): 133-170.

Viennot, L., Chauvet, F., Colin, P. & Rebmann, G. (2005). "Designing strategies and tools for teacher training: the role of critical details, examples in optic." Science Education **89**(1): 13-27.

Vogel, P. (1997). Chimie organique. Méthodes et modèles. Paris - Bruxelles, De Boeck Université.

Vollhardt, K. P. C. & Schore, N. E. (1999). Traité de Chimie Organique. *Traduction de la 3e éd. américaine.* Paris - Bruxelles, De Boeck Université.

Vosburg, D. A. (2008). "Teaching organic synthesis: A comparative case study approach." Journal of Chemical Education **85**(11): 1519-1523.

Walliser, B. (1977). Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes. Paris, Editions du Seuil.

Wang, H. (2005). "Application of ChemDraw NMR Tool: correlation of program-generated ^{13}C chemical shifts and pK_a values of para-substituted benzoic acids." Journal of Chemical Education **82**(9): 1340-1341.

Weeks, D. P. (1998). Pushing electrons: a guide for students of organic chemistry. *3e ed.*, Saunders College Publishing.

Weinhold, F. & Landis, C. R. (2001). "Natural bond orbitals and extensions of localized bonding concepts." Chemistry Education: Research and Practice **2**(2): 91-104.

Wentland, S. S. (1994). "A new approach to teaching organic chemical mechanisms." Journal of Chemical Education **71**(1): 3-8.

Wiberg, K. B. (1996). "The role of electrostatic effects in organic chemistry." Journal of Chemical Education **73**(11): 1089-1095.

Wood, C. (2006). "The development of creative problem solving in chemistry." Chemistry Education Research and Practice **7**(2): 96-113.

Wood, C. & Sleet, R. (1993). Creative problem solving in chemistry. London, The Royal Society of Chemistry.

Yamada, K., Kyotani, Y., Manabe, S. & Suzuki, M. (1979). "Total synthesis of (+-)-patchouli alcohol and (+-)-seychellene via a common homoisotwistane intermediate." Tetrahedron **35**: 293-298.

Zoller, U. (2001). "Alternative assessment as (critical) means of facilitating HOCS-promoting teaching and learning in chemistry education." Chemistry Education: Research and Practice in Europe **2**(1): 9-17.

Zoller, U. & Pushkin, D. (2007). "Matching Higher-Order Cognitive Skills (HOCS) promotion goals with problem-based laboratory practice in a freshman organic chemistry course." Chemistry Education: Research and Practice **8**(2): 153-171.

Zoller, U. & Tsaparlis, G. (1997). "Higher and Lower-Order Cognitive Skills: the case of chemistry." Research in Science Education **27**(1): 117-130.

Abstract

Organic chemistry is often considered as a difficult subject to teach and to learn. Students tend to see memorisation as a priority, and this is detrimental to developing reasoning in relation to models of chemical reactivity. The aim of our research was to provide knowledge that would be useful to improve the teaching and learning of organic chemistry in the first two years of a higher education course. We focussed our study on 1/ the effects of the way this teaching is currently structured: we wanted to determine how far this could be modified without altering the content, 2/ the different ways of teaching organic synthesis, reaction models and mechanisms and 3/ organic chemistry teachers at work.

Three studies were carried out. The first one aimed to determine whether students were able to reason by using the models, rather than merely memorizing and reciting. The tasks given to students in higher education evaluations and national teaching exams were analysed, and then we inferred the strategies used by students to resolve problems by analyzing of the way the models work. We also studied the relevance of the way the teaching syllabus and organic chemistry books were structured. In our second study we analyzed the way 9 organic chemistry teachers claim to teach in order to interpret the way they work. Our findings then enabled us to design a first version of an educational tool for teachers. This tool was tested during our third study which involved four pairs of teachers who were asked to simulate the planning of a lesson in class.

Our results highlight the fact that the tasks given to the students and the structuring of teaching by functional groups which is currently prevalent encourage students to use memorizing and reciting strategies rather than using modelling strategies. We suggest for example an overall restructuring of contents by increased modelling around the questions raised by organic chemists. We also propose that a data base - which we have chosen to call a 'réactiothèque' (catalogue of reactions) - should be used, and that modelling or organic synthesis should be taught in the early years of higher education courses. Teachers seem to be limited by the constraints of current institutional prescriptions and by their professional genre. They also lack Pedagogical Content Knowledge of modelling and organic synthesis in these early years, as well as PCK of the management of conclusion phases. Teachers were in two minds about the value of this educational tool. However they did manage to implement some aspects by adapting their practices to this tool, thereby enabling us to consider future improvements possible.

Keywords

Organic chemistry ; science education ; modelling ; work's analysis ; educational tool

Résumé

La chimie organique est souvent reconnue comme une discipline difficile à enseigner et à apprendre : par exemple les étudiants privilégient la mémorisation seule au détriment de raisonnements articulant les modèles de la réactivité chimique. Notre recherche avait pour objectif de produire des connaissances utiles à l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage de la chimie organique lors des deux premières années de l'enseignement supérieur. Nous avons centré nos travaux sur les effets de la structuration actuelle de cet enseignement (afin d'envisager sa modification tout en conservant le même contenu disciplinaire), sur les enseignements de la synthèse organique, des modèles et des mécanismes réactionnels ainsi que sur l'activité des enseignants de chimie organique.

Trois études ont été menées. La première étude avait pour objectif de déterminer si les étudiants pouvaient raisonner en utilisant les modèles plutôt que mémoriser-restituer : nous avons analysé les tâches soumises aux étudiants lors des examens ou concours, avant d'inférer les stratégies de leur résolution sous l'éclairage d'une analyse du fonctionnement des modèles ; nous avons étudié la pertinence de la structuration des programmes d'enseignement et des livres de chimie organique. La deuxième étude a consisté en l'analyse des pratiques déclarées de neuf enseignants de chimie organique pour interpréter leur activité. Les résultats obtenus jusqu'alors nous ont permis de concevoir une première version d'un instrument didactique à destination des enseignants. Cet instrument a été testé lors de la dernière étude auprès de quatre binômes d'enseignants placés en simulation de préparation de cours.

Nos résultats mettent en évidence que les tâches soumises aux étudiants et la structuration par fonction actuellement en place, incitent les étudiants à mettre en œuvre une stratégie de mémorisation-restitution au détriment d'une stratégie de modélisation. Nous proposons par exemple de restructurer globalement les contenus par modélisation croissante autour des questions du chimiste organicien, l'utilisation d'une base de données (« réactiothèque ») ou la mise en œuvre d'enseignements de la modélisation et de la synthèse organique dès les premières années. Les enseignants semblent contraints par les prescriptions institutionnelles en vigueur et leur genre professionnel ; il leur manquerait aussi des PCK (Pedagogical Content Knowledge) sur la modélisation, la synthèse organique dès les premières années, et la gestion des phases de conclusion. Les enseignants se montrent partagés vis-à-vis de l'instrument didactique, ils sont cependant parvenus à mettre en œuvre certains aspects en adaptant leur activité et en nous permettant d'envisager l'amélioration future de l'instrument.

Mots-clés

Chimie organique ; didactique ; structuration du savoir ; modèles ; mécanismes réactionnels ; synthèse organique ; activité du professeur ; psychologie ergonomique ; PCK ; instrument didactique