HAL
open science

De la démarche expérimentale à la conception expérimentale : Guidage de l'activité et décision didactique pour la rétroaction

Isabelle Girault

▶ **To cite this version:**

Isabelle Girault. De la démarche expérimentale à la conception expérimentale : Guidage de l'activité et décision didactique pour la rétroaction. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Université Grenoble Alpes, 2022. tel-03959560

HAL Id: tel-03959560

https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/tel-03959560v1

Submitted on 1 Mar 2023

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

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

UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Théorie modèle instrumentation pour la santé, la cognition et l'environnement

Didactique des sciences et EIAH

NOTE DE SYNTHESE

De la démarche expérimentale à la conception expérimentale : Guidage de l'activité et décision didactique pour la rétroaction

Isabelle GIRAULT

24 Novembre 2022

Composition du jury :

Jean-Marie BOILEVIN
Professeur émérite, Université de Bretagne Occidentale, Examinateur

Marianna BOSCH CASABO
Maître de conférence, Université de Barcelona, Espagne, Rapporteure

Philippe DESSUS
Professeur, Université Grenoble Alpes, Examinateur

Nathalie GUIN
Maître de conférence, Université Claude Bernard, Lyon 1, Rapporteure

Isabelle KERMEN
Professeur, Université de Bretagne Occidentale, Rapporteure

Erica de VRIES
Professeure, Université Grenoble Alpes, Examinatrice, Présidente du jury

Remerciements

Je voudrais exprimer ma sincère reconnaissance à Hamid Chaachoua qui m'a soutenu pendant la rédaction de ce manuscrit et a gentiment passé du temps à lire une très grande partie du document.

Mes remerciements vont aussi à Marianna Bosch Casabo, Nathalie Guin, et Isabelle Kermen qui me font l'honneur d'accepter d'être rapporteures. Je remercie également Jean-Marie Boilevin et Philippe Dessus pour leur participation au jury de soutenance, ainsi que Erica de Vries d'avoir présidé ce jury.

Ce travail doit beaucoup aux collaborations et discussions stimulantes au sein de l'équipe MeTAH du laboratoire LIG.

Je pense en tout premier lieu à Cédric d'Ham, avec qui j'ai travaillé pendant toutes ces années, sur tous les projets de recherche. Sa rigueur scientifique m'a beaucoup apporté. Nous arrivons encore à partager un bureau après toutes ces années !

J'ai aussi beaucoup partagé avec Patricia Marzin avant qu'elle quitte le laboratoire. Elle m'a fait confiance en me proposant de co-encadrer les thèses de Reinaldo Saavedra et Catherine Bonnat, dont le travail de thèse contribue aussi à ce manuscrit d'habilitation.

Claire Wajeman a également toujours été à mes côtés, que ce soit au laboratoire, ou lors des séances de sport. Elle a même dû apprendre la chimie pour partager des projets avec nous !

Herminia Bettega a eu le courage de nous accompagner dans le début de notre aventure avec les EIAH au LIDSET. Même si elle a rapidement bifurqué dans une autre direction, elle a toujours été présente pour des discussions de chimie et des moments de partages conviviaux.

Nadine Mandran est aussi une collègue précieuse, que ce soit pour l'analyse des données ou tout le reste de nos échanges !

Nicolas Balacheff a fait confiance à la petite équipe Seed en nous accueillant dans son laboratoire de recherche, le Leibniz, en 2004. Il nous a toujours beaucoup encouragé dans nos réflexions scientifiques.

Je pense aussi à Christian Hoffmann et Maelle Planche, qui ont rejoint notre groupe plus récemment et avec qui je suis très heureuse de travailler au quotidien et d'entamer de nouveaux sujets de recherche.

Merci à tous les autres membres de l'équipe MeTAH et aux ingénieurs qui participent à nos projets.

En plus des doctorants, ce travail n'aurait pas existé sans la participation de plusieurs étudiants de master avec qui j'ai travaillé pendant leur stage, de nombreux élèves et étudiants auprès de qui nous avons pu mener des expérimentations. Je leur exprime ici toute ma reconnaissance. Une mention spéciale à tous les enseignants de lycée avec qui nous avons pu collaborer pour tester des situations dans leurs classes, et qui ont rendu ce travail possible.

Les conditions particulières de l'écriture de ce manuscrit pendant plusieurs confinements n'ont pas facilité la tâche, mais ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien sans faille d'Alain, merci pour tout !

Sommaire

NOTE DE SYNTHESE **1**
Remerciements **2**
Sommaire **3**
Lexique **6**
Chapitre 1 - Introduction **7**
Chapitre 2 - Problématique **8**
2.1. La démarche expérimentale du scientifique 9
2.2. La transposition de la démarche du scientifique dans l'enseignement 10
2.3. Modèle du cycle expérimental pour caractériser des démarches expérimentales dans l'enseignement 11
2.4. La conception expérimentale 13
Chapitre 3 - Présentation d'EIAH **14**
3.1. Utilisation d'environnements informatiques pour soutenir l'apprentissage des sciences 14
3.2. Copex-chimie 15
3.3. SCY-Lab 16
3.4. LabNbook 17
3.5. Copex 19
3.6. TitrAB 21
Chapitre 4 - Modélisation de l'activité de conception expérimentale **23**
4.1. Modélisation du protocole expérimental 23
4.1.1. Modèle de description du protocole expérimental 23
4.1.2. Analyse de pratiques grâce au modèle du protocole expérimental 25
4.2. Critères d'évaluation de la conception expérimentale 26
4.3. Modèle descriptif de la conception d'une expérience par des élèves : les « six clés de la conception expérimentale » 28
4.4. Modèle praxéologique et T4TEL 29
4.4.1. Présentation du modèle T4TEL 29
4.4.2. Le lien entre technique et type de tâches 30
4.4.3. Types de tâches et variable dans T4TEL 31
4.4.4. Les praxéologies personnelles dans T4TEL 31
4.5. Illustration de l'utilisation de T4TEL dans une activité de conception expérimentale (cas de TitrAB) 32
4.5.1. Types de tâches de manipulation et types de tâches de conception 33
4.5.2. Sélection des tâches dévolues à l'élève 36
4.5.3. Conception des situations d'enseignement 36
4.5.4. Les erreurs des élèves et praxéologies personnelles 38
Chapitre 5 - Guidage des démarches expérimentales et de la conception expérimentale par un EIAH **40**

5.1. Synthèse de la littérature sur le guidage des démarches expérimentales avec un EIAH.....40
5.1.1. Introduction sur un type de guidage : les étayages.....40
5.1.2. Un type d'étayage par des EIAH : les systèmes de tuteurs intelligents (STI).....42
5.1.3. Le guidage par des EIAH dans des activités de démarche expérimentale 43
5.1.4. Revue de la littérature sur l'efficacité des guidages par des EIAH pour des apprenants impliqués dans des activités de démarche expérimentale 47
5.1.5. Focus sur des guidages de la conception expérimentale 48
5.2. Guidages fixes dans nos travaux sur la démarche expérimentale 50
5.2.1. SCY-Lab.....50
5.2.2. LabNbook.....50
5.3. Guidages fixes dans nos travaux sur la conception expérimentale 52
5.3.1. Copex-chimie 52
5.3.2. Copex (dans LabNbook).....53
5.3.2.1. Thèse de Reinaldo Saavedra.....53
5.3.2.2. Projet avec un enseignant de lycée.....54
5.3.2.3. Thèse de Catherine Bonnat.....56
5.3.3. TitrAB.....61
5.4. Guidages adaptatifs dans nos travaux sur la conception expérimentale.....62
5.4.1. Études avec Copex chimie.....62
5.4.1.1. Présentation des guidages adaptatifs dans ce logiciel 62
5.4.1.2. Évaluation de l'impact des guidages sur la réussite des élèves à concevoir une expérience dans Copex-chimie 64
5.4.1.3. Évaluation de l'impact des guidages sur les apprentissages et stratégies des étudiants au cours d'une activité de conception expérimentale dans Copex-chimie.....66
5.4.2. Études avec TitrAB 71
5.4.2.1. Présentation des guidages adaptatifs dans ce logiciel 71
5.4.2.2. Évaluation des comportements d'étudiants à partir des traces d'activité du logiciel TitrAB.....73
Chapitre 6 - Prospectives de recherche 77
6.1. Améliorer les décisions didactiques pour la rétroaction.....77
6.1.1. Évolutions du diagnostic en lien avec le modèle de connaissance.....77
6.1.2. Évolution de la décision didactique et pédagogique pour adapter le guidage.....79
6.1.2.1. Les principes de décision dans TitrAB.....79
6.1.2.2. Prise en compte des praxéologies personnelles.....80
6.1.2.3. Ordre des contraintes dans les rétroactions envoyées aux étudiants 81
6.1.2.4. Illustration de la décision didactique et pédagogique.....81
6.1.3. Évaluation du processus de décision didactique et pédagogique 82
6.1.3.1. Réflexion sur l'évaluation de l'apprentissage 82
6.1.3.2. Mise en place d'une expérimentation.....83
6.2. LabNbook et la démarche expérimentale 85

6.2.1. Questions de recherche 85
6.2.2. Méthode expérimentale 86
6.2.2.1. Analyse des missions 86
6.2.2.2. Entretien avec des enseignants 86
6.2.2.3. Utilisation des données pour répondre aux questions de recherche 86
6.3. LabNbook et les tableaux de bord étudiant 89
6.3.1. Etat de l'art sur les attentes des enseignants 89
6.3.2. Indicateurs et visualisations dans LabNbook 90
6.3.3. Évaluation des propositions d'indicateurs et visualisations 92
Chapitre 7 - Conclusion 95
Bibliographie 97
Annexes 104
Annexe 1 : Praxis de manipulation de l'expérience de titrage proposée dans TitrAB et types de tâche de conception associées 104
Annexe 2 : Les 16 exercices proposés dans le logiciel TitrAB 106

Lexique

Ce lexique inclut quelques mots qu'un non spécialiste dans un des domaines de ce mémoire, pourra apprécier de trouver.

- Conception expérimentale : conception d'expériences
- Copex : il s'agit de l'éditeur de protocole de LabNbook.
- EIAH : Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain. Selon le texte de Tchounikine et Tricot (2011) « un EIAH est un programme destiné à être utilisé par les apprenants impliqués dans une situation d'enseignement et à accompagner ou susciter leur apprentissage. » (p.168). Il s'agit donc d'un logiciel qui aura pour but d'enseigner ou d'aide à l'enseignement. Dans ce document, j'utilise parfois le terme logiciel, bien qu'il soit plus général, à la place du terme EIAH pour éviter les répétitions.
- Élève / Étudiant : le mot élève est principalement utilisé pour relater une étude qui s'est déroulée au niveau du lycée, et le mot étudiant quand l'étude concerne le niveau universitaire. Néanmoins, le mot élève est privilégié quand les deux populations sont concernées.
- Expérience : elle contient un protocole expérimental à réaliser.
- STI : acronyme pour les Systèmes de Tuteurs Intelligents, connu sous la forme anglophone ITS.
- Labdoc (LD) : c'est un élément de rapport de la plateforme LabNbook, qui peut être de quatre types (texte, dessin, protocole, jeu de données).
- Logiciel : il s'agit d'un terme général qui inclut les EIAH mais le logiciel ne possède pas forcément d'intelligence.
- Mode opératoire : c'est un document qui décrit un protocole expérimental. Il n'a pas d'ancrage épistémologique mais est souvent utilisé dans des documents d'enseignement comme synonyme de protocole expérimental.
- Protocole expérimental : liste des tâches expérimentales à exécuter, suivant une organisation temporelle et/ou logique. Elle est décrite par un mode opératoire et correspond à une expérience.
- TAD : Théorie Anthropologique du Didactique, qui permet de modéliser l'activité humaine.
- T4TEL : utilisé dans les travaux pour modéliser l'activité de l'élève qui conçoit une expérience
    - Extension de la TAD
    - *T4* renvoie au quadruplet praxéologique (Type de tâches, Technique, Technologie, Théorie) et *TEL* pour Technology Enhanced Learning
- TP : travaux pratiques

Chapitre 1 - Introduction

Ce chapitre fait le lien entre la notice individuelle qui donne une vision d'ensemble de ma carrière et cette note de synthèse qui détaille mes activités de recherche, passées et futures.

Depuis le début de ma carrière en didactique des sciences, mes travaux ont contribué à la problématique suivante : comment améliorer l'apprentissage des sciences dans sa dimension expérimentale ? Pour faire avancer cette problématique, mes recherches sont centrées sur la conception et l'analyse de situations de travaux pratiques (TP) innovantes avec l'aide d'Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), en étroite collaboration avec plusieurs collègues de l'équipe Modèles et Technologies pour l'Apprentissage Humain (MeTAH), du laboratoire d'informatique de Grenoble (LIG). Mes travaux portent sur les démarches expérimentales et de façon plus spécifique sur une phase de ces démarches, à savoir la conception expérimentale. Il s'agit de l'activité d'un élève ou étudiant qui conçoit une expérience afin de répondre à un problème scientifique. Mes recherches impliquent d'une part la modélisation de la tâche de conception expérimentale en sciences expérimentale, et d'autre part la conception et l'évaluation d'EIAH pour guider cette conception expérimentale.

Le chapitre 2, intitulé *Problématique*, permet de replacer l'ensemble de mes travaux autour de la conception expérimentale, et des démarches expérimentales. Je commence par faire une petite synthèse de la littérature sur ces démarches, avant de présenter un schéma synthétique de mes travaux.

Dans le chapitre 3, je présente des EIAH conçus et développés dans l'équipe MeTAH, qui servent de support aux travaux exposés dans les chapitres suivants.

Le chapitre 4 correspond à la partie conceptuelle de mes travaux, autour de la modélisation de la conception expérimentale. Une grande part de mon activité de recherche a consisté à proposer un modèle du protocole expérimental ainsi qu'un modèle de l'activité de l'élève qui conçoit une expérience. Ce travail s'est enrichi au fur et à mesure des années grâce au modèle praxéologique et à son extension T4TEL développée dans le laboratoire LIG-MeTAH. Les interactions avec Hamid Chaachoua, collègue didacticien des mathématiques, autour de l'encadrement de travaux de recherche, ont contribué à étendre le domaine d'application des praxéologies et T4TEL, initialement pensée pour la didactique des mathématiques, aux sciences expérimentales. La mise en œuvre de ces modèles sera illustrée au travers du logiciel TitrAB.

Dans le chapitre 5, de nombreux résultats issus de nos travaux sont rassemblés autour du guidage par des EIAH. La mise en place de pédagogies favorisant l'implication des étudiants, comme le fait de faire mener une démarche expérimentale à des étudiants, conduit à des tâches nouvelles pour les étudiants et les enseignants. Les étudiants doivent devenir autonomes dans la production de solutions. Les enseignants doivent suivre, structurer et orienter le travail des étudiants tout en évitant d'imposer une méthode de résolution préétablie. Toutes ces tâches accroissent la complexité des séquences pédagogiques et font émerger le besoin d'un support numérique adapté en complément de l'aide apportée par l'enseignant ou des pairs. Ce chapitre débute par une synthèse de la littérature sur les guidages par des EIAH dans le cadre d'activités de démarches expérimentales, ce qui permet de positionner nos divers travaux effectués sur ce thème. La réflexion sur les guidages s'est formalisée, grâce à la co-organisation avec les collègues du projet SCY, d'un workshop qui nous a permis d'avancer collectivement sur la notion de guidage dans les EIAH, puis a été ensuite nourrie par des interactions avec le groupe « Technology-enhanced Learning in Science » dirigé par Marcia Linn à Université de Berkeley (USA) en 2012. Leurs travaux dans le domaine des EIAH, supports à l'apprentissage par investigation en sciences, font référence dans ce domaine de recherche.

Le chapitre 6 terminera ce mémoire en présentant des prospectives de recherche.

Chapitre 2 - Problématique

Les travaux présentés portent sur la conception et l'analyse de situations de travaux pratiques innovantes, avec comme support des environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH). Ces environnements informatiques sont utilisés dans des situations d'enseignement mettant en jeu une démarche expérimentale ou seulement une étape de la démarche, à savoir la conception expérimentale.

Ces travaux ont été effectués en étroite collaboration avec trois collègues : Cédric d'Ham (didacticien de la chimie dans le domaine des EIAH et développement informatique), Patricia Marzin (didacticienne de la biologie dans le domaine des EIAH) et Claire Wajeman (didacticienne de la physique dans le domaine des EIAH), et avec l'aide des étudiants de master et des doctorants avec lesquels j'ai travaillé. Selon les projets, j'ai eu l'occasion de collaborer avec diverses autres personnes, au niveau national ou international.

La Figure 1 donne une vision synthétique de nos travaux autour des démarches expérimentales et de la conception expérimentale, avec les projets qui ont donné lieu à des EIAH (en vert), des modèles que nous avons proposés en lien avec le protocole expérimental et sa conception (en bleu), ainsi que des thèmes de recherche plus généraux (en marron).

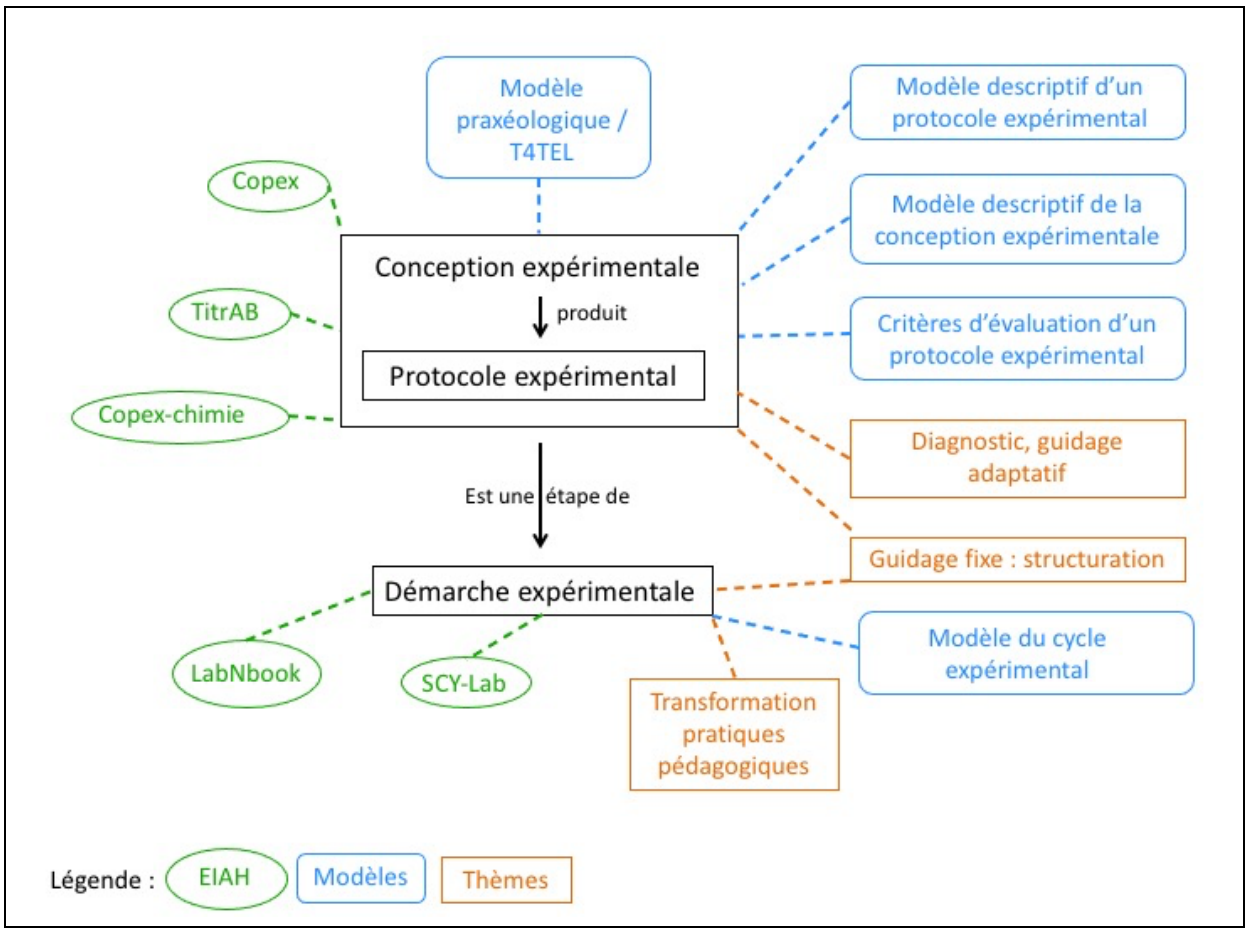


Figure 1. Schéma récapitulatif des objets d'apprentissage (en noir), des EIAH produits (en vert), des modèles proposés (en bleu) et de thèmes généraux qui ont guidé des recherches (en marron).

La Figure 1 sert de fil conducteur dans tout le document. Les objets d'apprentissage (démarches expérimentales et conception expérimentale) sont au centre de la recherche. Autour, nous trouvons les thématiques de recherche abordées avec ces objets de recherche, qui concernent, l'un ou l'autre des

objets ou bien les deux. Ces objets et thématiques de recherche ont donné lieu au développement de modèles et sont matérialisés et supportés par des EIAH.

Dans ce chapitre sont présentées les démarches expérimentales et la conception expérimentales. Nous commençons par des études épistémologiques permettant de décrire le fonctionnement de la science, dont certaines sont effectuées à des fins d'enseignement, avant de montrer comment la démarche du scientifique est transposée dans la classe. Ensuite, nous proposons un modèle des démarches expérimentales dans l'enseignement, et terminons pas un focus sur la conception expérimentale, le deuxième objet d'apprentissage de notre étude.

2.1. La démarche expérimentale du scientifique

Une étude épistémologique de Dunbar (1999) a consisté à observer des réunions de laboratoire hebdomadaires entre chercheurs en biologie moléculaire et immunologie, afin d'analyser les types de réflexion et de raisonnement que les scientifiques utilisent lorsqu'ils formulent des théories, analysent des données, conçoivent des expériences et construisent des modèles. C'est au cours de ce type de réunion que les scientifiques présentent leurs données, raisonnent sur les résultats et proposent de nouvelles expériences et théories. Les discussions des scientifiques mettent en évidence un grand nombre de résultats inattendus. Les scientifiques doivent évaluer quels résultats sont dus à une erreur méthodologique, à des hypothèses erronées, à des événements fortuits ou à de nouveaux mécanismes. Ces résultats inattendus conduisent à la réplication, à la modification du protocole ou à l'utilisation d'un protocole entièrement nouveau. Dans l'ensemble, ce travail sur la conception expérimentale indique que si les expériences sont habituellement conçues dans le contexte de questions théoriques, une grande partie du processus de conception expérimentale est contrainte par des considérations méthodologiques, avec un processus qui n'est pas linéaire.

D'autres recherches se sont intéressées à décrire le fonctionnement de la science avec une visée d'enseignement, dans une perspective de transposition. Ainsi des chercheurs en didactique des sciences se sont interrogés sur le statut de l'expérience dans la recherche scientifique et ont proposé des catégories d'expériences. Par exemple, grâce à une étude historique dans le champ de la recherche scientifique, Cariou (2015) distingue l'expérience pour voir, l'expérience de test d'hypothèse, l'expérience de détermination quantitative ou qualitative, l'expérience pour produire un effet visé, et l'expérience analogique (qui inclut les simulations). Quant à Guillon (1995, p. 118), une analyse des pratiques de chercheurs lui permet de différencier quatre types principaux de démarches du physicien, non exclusives, la démarche mathématique, la démarche de simulation, la démarche théorique et la démarche expérimentale. Dans son travail, le physicien articule plusieurs démarches, dont la confrontation est un passage obligé. Dans la plupart des cas il s'agit d'une confrontation avec des résultats expérimentaux, dont un outil privilégié est l'estimation des incertitudes et leur analyse. Il s'agit là d'une situation caractéristique des sciences expérimentales. La réalité du travail du physicien présente « de nombreux retours en arrière, des va-et-vient d'une démarche à l'autre, d'une étape à l'autre au sein d'une même démarche (…) Les contraintes de la technique obligent parfois à changer de méthode de mesure, à choisir une autre grandeur caractéristique plus accessible, à reprendre l'étude théorique car tel effet que l'on pensait négligeable ne l'est pas avec le matériel utilisé… ». Le côté non linéaire de la démarche du chercheur a été également précisé par Giordan (1999, p. 54) car « une démarche expérimentale doit être envisagée comme un processus dans le temps, où question, hypothèse, et expérience interfèrent mutuellement. Progressivement le savoir se précise, les hypothèses évoluent, de nouvelles expériences sont réalisées. A chaque étape correspond un nouveau modèle qui sous-tend un questionnement et une interprétation. Rien n'est linéaire ».

2.2. La transposition de la démarche du scientifique dans l'enseignement

Qu'en est-il du côté de l'enseignement ? Ce paragraphe débute par la position de chercheurs en didactique des sciences sur la différence de comportements entre novice et experts et sur ce que devrait être l'enseignement expérimental des sciences. Nous donnons ensuite des exemples de ce qui se déroule dans les classes. De nombreuses recherches en didactique des sciences se sont intéressées à la façon dont les sciences expérimentales sont enseignées et montrent que la démarche du scientifique n'est pas souvent présente. Nous l'illustrons par quelques exemples, avant de décrire des tentatives de transposition de la démarche du scientifique.

Des études sur la différence entre chercheurs et étudiants, citées dans Séré (2002) suggèrent que « si nous nous tournons vers la pratique des chercheurs (Beney, 1998), nous constatons qu'il existe une grande différence entre les chercheurs et les étudiants : les premiers disposent de procédures facilement accessibles ; les seconds sont privés de procédures et sont continuellement entravés par des obstacles correspondants. (…) Ce constat est cohérent avec l'affirmation selon laquelle il est illusoire de vouloir faire imiter aux étudiants l'activité des chercheurs (N'Tombela, 1999) ». Ainsi une transposition semble nécessaire, avec un accompagnement de l'activité expérimentale.

Develay (1989) caractérise la transposition de la démarche expérimentale dans l'enseignement, par diverses étapes, identifiées par leur situation dans une chronologie, ainsi que par l'ensemble des interactions qui les unissent en un système cohérent. Ce sont la formulation du problème, l'émission d'hypothèses, la vérification de l'hypothèse par la conception de l'expérience, la réalisation de l'expérience, l'analyse des résultats et l'interprétation des résultats, avec une présentation plus linéaire que la démarche du scientifique. Plus récemment, l'apprentissage expérimental basé sur l'investigation a été décrit par un cycle d'investigation (Pedaste et al., 2015), dans lequel nous retrouvons les phases de la démarche expérimentale proposée par Develay (1989), avec une forte dimension cyclique caractérisant les relations entre les phases. Par ailleurs, l'emploi en classe des différents types d'expériences identifiés chez les scientifiques a été examiné en fonction de leur valeur éducative. « Les points de vue convergents de Dewey et de Piaget forment une base théorique qui, sur cette question, n'a pas été contestée : pour eux, comme pour Bruner, c'est l'expérience conçue par l'élève pour tester ses propres hypothèses qui a le plus d'impact sur sa formation scientifique » (Cariou, 2015).

Néanmoins, dans leur synthèse bibliographique sur l'enseignement des sciences au laboratoire, Hofstein et Lunetta (2004) montrent la prédominance des approches pédagogiques « recette de cuisine », qui sont une transposition de l'inductivisme. Dans ce type d'enseignement, les élèves effectuent des expériences en suivant une liste de tâches fournies. Cet enseignement traditionnel a ses limites car il ne favorise que certains types d'apprentissages. « Les TP « classiques » visent certains objectifs bien repérés tels que : se servir d'un appareil, estimer l'incertitude sur le résultat, réaliser un montage électrique, tracer un graphe... » (Guillon, 1995, p. 119). Ainsi dans ce type de TP, certaines phases des démarches du physicien sont absentes : « la phase de questionnement n'existe pas en général dans les TP « classiques », (…) l'étudiant n'a pas non plus à mettre au point le protocole d'expérience ni le protocole d'exploitation des mesures, il lui suffit de suivre les indications du polycopié. Parfois même le montage des appareils est déjà fait, il n'y a plus qu'à mettre en marche et à effectuer les mesures. Pourtant cette phase d'élaboration du protocole d'expérience peut être riche d'interactions avec la théorie » (Guillon, 1995, p. 119). Suivre des instructions n'engage pas les élèves à penser à ce qu'ils font et pour qui ils le font (Millar, 2004). Par ailleurs, Richoux & Beaufils (2005) ont étudié la transposition didactique lors de la conception de travaux pratiques par des enseignants de lycée en France, c'est-à-dire qu'ils recherchent quelle part des activités scientifiques (en référence aux démarches proposées par Guillon, 1995) se retrouvent dans les travaux pratiques. Les résultats de cette étude de cas montrent que « les activités se trouvent essentiellement centrées sur l'action : réaliser les expériences, faire des mesures, modéliser les résultats expérimentaux par une relation physico-mathématique faisant office de

conclusion. Les activités liées à la problématisation, à l'appropriation du questionnement initial, ainsi que celles relatives à l'analyse critique des résultats sont souvent très réduites, si ce n'est absentes » (p. 33). De même, lors de séances de travaux pratiques en Angleterre avec des élèves de 11-16 ans, Abraham et Millar (2008) ont observé que très peu de temps était consacré à des activités pédagogiques qui permettent aux élèves de faire des liens entre les objets qu'ils manipulent et des connaissances théoriques. Les élèves devaient se concentrer sur des observations et des mesures et grâce à un apprentissage par induction, les enseignants espéraient que les connaissances, qu'ils avaient l'intention que les élèves apprennent, émergent des activités réalisées. Or dans l'enseignement, un rôle important du travail en laboratoire est d'aider les élèves à développer des liens entre les observations et les idées.

Néanmoins, il existe des situations d'enseignement ayant la volonté de faire vivre aux élèves la démarche du scientifique. Par exemple, la démarche OHERIC (Observation, Hypothèse, Expérience, Résultat, Interprétation, Conclusion) était proposée dans les programmes, mais elle est critiquée par Giordan (1999, p. 49) : « la démarche expérimentale (…) est très souvent défigurée en classe. Fréquemment, cette approche est proposée au travers d'un schéma simplifié, comportant six étapes : c'est la démarche OHERIC. (…) La méthode OHERIC est en fait une reconstruction par la pensée a posteriori : une fois que le chercheur a trouvé une réponse à ses interrogations, il organise sa publication de la sorte pour des finalités de présentation ». Depuis environ 15 ans, dans un contexte international de rénovation de l'enseignement scientifique, les programmes d'enseignement primaire et secondaire proposent aux élèves de mener des démarches d'investigation (« inquiry learning » en anglais). Ce terme est utilisé dans des approches variées d'enseignement impliquant une vision constructiviste de l'apprentissage. Dans l'enseignement primaire et secondaire français, « la démarche d'investigation a été mise en place (…) on souhaite que puissent être mises en œuvre des expériences, et que les élèves mènent une investigation par eux-mêmes. L'expérience privilégiée dans une telle optique est bien celle qu'élabore l'élève en fonction de ses idées » (Cariou, 2015).

Nous présentons par la suite un modèle des démarche expérimentales dans l'enseignement, qui nous sert de référence pour la suite de nos études.

2.3. Modèle du cycle expérimental pour caractériser des démarches expérimentales dans l'enseignement

Develay (1989, p. 4) distingue la méthode expérimentale de la démarche expérimentale. Il parle de « méthode expérimentale au plan pédagogique lorsque l'itinéraire que les élèves auront à emprunter est largement prédéterminé. Une démarche expérimentale à l'inverse rendrait compte d'une conduite de la pensée (…) moins contrainte par des indications d'actions de la part de l'enseignant ». Dans le cadre de l'enseignement, nous ne conservons pas le terme de méthode expérimentale mais nous parlerons des démarches expérimentales, afin de rendre compte de l'ensemble des différents itinéraires possibles. Ceci est représenté par le cycle expérimental (Figure 2).

Nous avons repris les étapes de la démarche expérimentale proposées par Develay (1989) en intégrant une structure cyclique à la façon de Pedaste et al. (2015). De plus, nous avons inscrit le cycle expérimental dans les deux mondes « des théories & modèles » et « objets & événements » proposés par Tiberghien dans ses travaux sur la modélisation en sciences (Tiberghien et al., 2009). Même si ce modèle a été pensé pour la physique, il nous semble applicable à l'ensemble des sciences expérimentales dans lesquelles il existe des faits et des idées.

Notre transposition de la démarche expérimentale du scientifique pour l'enseignement consiste en une séquence de sept types de tâches pouvant être assignés à l'étudiant (Figure 2).

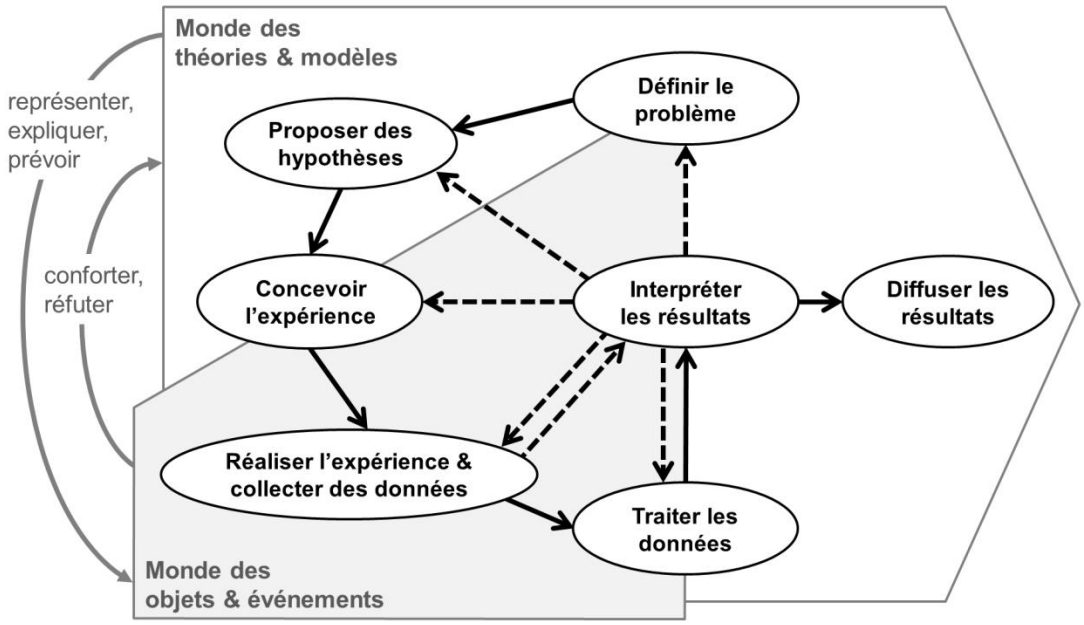


Figure 2. les démarches expérimentales dans l'enseignement : le cycle expérimental (d'Ham et al., 2020).

Ci-dessous, ces types de tâches ou étapes sont décrites succinctement.

- *Définir le problème :* le problème peut correspondre soit à une investigation (par exemple déterminer quelle est la condition pour qu'un objet flotte) soit à un problème technique (par exemple déterminer la concentration d'une solution par un dosage) ; il peut être issu de réflexions théoriques ou de l'observation d'un fait singulier.
- *Proposer des hypothèses* : l'hypothèse, au sens large, peut correspondre à une relation entre grandeurs (cas de l'investigation par exemple) ou un résultat numérique anticipé (cas d'un problème technique par exemple).
- *Concevoir l'expérience* : ce type de tâches a pour objet de produire un protocole expérimental qui est un document ayant un statut bien précis en sciences expérimentales.
- *Réaliser l'expérience & collecter des données* : les données peuvent être des phénomènes observés ou des mesures.
- *Traiter les données* : ce type de tâches correspond à appliquer des transformations mathématiques aux données numériques ou des traitements aux images collectées ; c'est ici qu'ont lieu les tâches de modélisation.
- *Interpréter les résultats* : ce type de tâches est central dans la démarche car c'est ici que la plupart des actions de contrôle (par ex. la vérification de la valeur d'un témoin ou la comparaison d'un résultat à une référence) sont effectuées.
- *Diffuser les résultats* : la diffusion peut se faire à destination de l'enseignant et/ou des pairs.

Les types de tâches de la démarche sont ici présentés séquentiellement mais cela ne signifie pas que la démarche expérimentale est linéaire. Les nombreux chemins en pointillés sur la figure correspondent aux différents retours que l'étudiant peut faire suite à des contrôles. De plus, cette présentation ne signifie pas que dans une séquence d'enseignement, tous les types de tâches sont à la charge de l'élève : c'est l'enseignant qui, selon la pédagogie choisie, décide des tâches dévolues à l'élève. Finalement, nous avons incorporé dans le schéma l'idée que la démarche expérimentale met nécessairement en jeu des éléments de deux mondes : le monde des théories & modèles et le monde des objets & événements (Tiberghien et al., 2009). En situant les étapes du cycle expérimental dans ces deux mondes, quatre types de tâches sont placés à l'interface des deux mondes : *Définir le problème, Concevoir l'expérience*, *Traiter les données* et *Interpréter les résultats*. Nous pensons que ces moments de la démarche, s'ils

sont à la charge des étudiants dans la pédagogie mise en place par les enseignants, sont centraux dans la construction de sens par les étudiants car ils les obligent à articuler des concepts ou relations issus du monde des théories & modèles avec des matériels, phénomènes ou mesures du monde des objets & événements.

2.4. La conception expérimentale

Nous terminons ce chapitre par un focus sur la conception d'expériences. Beaucoup de travaux, notamment relatifs à la démarche d'investigation, mettent l'accent sur la formulation d'hypothèses, la sélection des paramètres, l'analyse des résultats et négligent la conception de l'expérience et le protocole. Si cela peut être adéquat pour des expériences très simples (primaire, collège), ce n'est plus le cas au lycée ou à l'université, où les pratiques expérimentales deviennent complexes, font appel à du matériel sophistiqué, des techniques expérimentales éprouvées, avec des théories et des modèles complexes sous-jacents, à apprendre et comprendre. Dans le cas d'utilisation d'outils numériques, certains travaux relatent de situations où la conception de l'expérience est limitée à la sélection de paramètres d'une simulation, sur la base d'une hypothèse et de l'observation du résultat (par ex. McElhaney & Linn, 2011).

Néanmoins, il existe des études s'intéressant à la conception d'expériences par des élèves dans le laboratoire réel. Etkina, Murthy et Zou (2006) ont développé *« The Investigative Science Learning Environment »* (ISLE) qui correspond à une méthode d'enseignement dans laquelle les étudiants conçoivent leur propres expériences pour investiguer de nouveaux phénomènes, tester des hypothèses, ou encore résoudre des problèmes concrets ou déterminer une quantité inconnue. La conception expérimentale favorise l'acquisition de compétences scientifiques, aide les étudiants à construire du sens et de nouvelles habiletés (Karelina & Etkina, 2007) ; (Etkina et al., 2010) et peut être utile pour acquérir des connaissances procédurales (Séré, 2002). Arce et Betancourt (1997) ont constaté que les élèves montrent une meilleure compréhension, lors de l'examen, des notions liées aux expériences qu'ils ont eux-mêmes conçues. Néanmoins faire concevoir une expérience par des élèves est une tâche difficile. Séré et Beney (1997) montrent que dans les TP classiques, les étudiants ne sont pas habitués à planifier des actions, il y a « atomisation de l'action » : les consignes sont décomposées en actions élémentaires qui sont immédiatement exécutées, ce qui semble être un obstacle aux apprentissages conceptuels car les étudiants ne comprennent pas toujours à quoi servent les actions. Pour aider les étudiants dans cette activité complexe, nous avons cherché à mieux comprendre cette activité, négligée, en cherchant le parallèle avec les processus de conception dans d'autres domaines (architecture, conception mécanique, etc.). Des points communs peuvent être illustrés en se référant aux trois caractéristiques des processus de conception (d'Ham et al., 2004 ; de Vries, 2006) : (i) la création de quelque chose de nouveau, qui peut se matérialiser par la possible adaptation de protocoles existants aux spécificités de chaque situation expérimentale ; (ii) la construction d'une représentation, qui peut correspondre à l'écriture du protocole avec ses actions à exécuter ; (iii) l'artefact doit répondre à un besoin. Dans le cas de la conception expérimentale, l'objectif principal est de répondre à un problème posé et d'écarter les autres explications pour les résultats trouvés une fois le protocole exécuté.

En conclusion, faire concevoir une expérience par des élèves dans le cadre d'une démarche expérimentale n'est pas une tâche aisée. Les modèles indiqués dans la Figure 1 vont nous aider à étudier l'activité de conception expérimentale ; ils sont présentés dans le chapitre 4, puis repris dans le chapitre 6 (prospectives). Nos travaux s'intéressent aux guidages de la conception expérimentale et de la démarche expérimentale, et sont décrits dans les chapitres 5 et 6, tandis que la transformation des pratiques pédagogiques est abordée dans les prospectives. Ces thématiques de recherche sont supportées par les EIAH répertoriés dans la Figure 1, et sont présentés au préalable dans le chapitre 3.

Chapitre 3 - Présentation d'EIAH

Ce mémoire s'appuie sur plusieurs EIAH développés dans l'équipe MeTAH, pour lesquels j'ai participé à la conception. Ce chapitre est consacré à une présentation descriptive de ces EIAH. Dans les chapitres suivants, ils seront supports aux recherches présentées.

Pour faire le lien avec le chapitre précédent, ces EIAH permettent de faire travailler les étudiants sur l'ensemble du cycle expérimental (SCY-Lab, LabNbook) ou sur une partie du cycle expérimental avec un rôle central pour la conception expérimentale (Copex-chimie, Copex, TitrAB).

Après une brève introduction, les cinq EIAH conçus et étudiés sont présentés.

Tout au long de ce chapitre, les termes *activité, étape et action* sont utilisés alors qu'ils sont définis dans le chapitre 4, partie 4.1.1 (modèle de description du protocole expérimental). Une brève définition de ces termes dès ce chapitre peut faciliter la lecture de la description des EIAH.

- L'activité de l'élève correspond, dans nos situations, à ce que fait l'élève et peut être décomposée en actions. Ceci n'est pas à confondre avec l'activité pédagogique mise en place par un enseignant ou proposée par un EIAH.
- Une étape permet de rendre la lecture du protocole plus aisée en explicitant des buts intermédiaires de la manipulation expérimentale. Elles révèlent la logique de l'organisation du protocole, en lien avec la stratégie.
- Une action représente la part effective du protocole, en lien avec les compétences de l'expérimentateur.

3.1. Utilisation d'environnements informatiques pour soutenir l'apprentissage des sciences

De nos jours, les environnements informatiques les plus utilisés pour l'enseignement des sciences sont de plusieurs types.

- Des environnements pour l'éducation qui intègrent un contenu disciplinaire riche mais statique, comme des cours en ligne ou des simulations.
- Des plateformes d'apprentissage (ou LMS pour Learning Management System), comme par exemple Moodle et Dokeos ou autres plateformes utilisées dans un établissement d'enseignement. Ces environnements ne possèdent pas d'outils spécifiques pour les sciences.
- Des environnements qui favorisent la production collaborative, comme Google drive qui est très utilisé. Ceux-ci n'incluent pas de gestion pédagogique, pas d'outils spécifiques pour les sciences, et ne distinguent pas les rôles d'enseignant et d'élève.

D'autres types d'environnements pédagogiques sont moins utilisés mais plus spécifiques des sciences expérimentales. Certains ont été développés lors de projets de recherche, dans le but d'accompagner l'apprentissage des sciences par investigation. Parmi eux, WISE (https://wise.berkeley.edu) est la plateforme la plus répandue ; elle est utilisée pour des activités pédagogiques au niveau de l'école secondaire principalement. SCY-Lab (IP SCY 2008-2012) promeut l'apprentissage par investigation mais son utilisation est restreinte à des cas de démonstration. En revanche, Go-Lab (http://www.go-lab-project.eu/) est un environnement diffusé. Il permet à des élèves d'école primaire ou secondaire d'effectuer des expériences scientifiques avec des laboratoires en ligne (distants ou virtuels) dans un environnement d'apprentissage structuré (appelé weSpot). Dans Go-Lab, les enseignants peuvent facilement concevoir leurs propres activités pédagogiques. Une caractéristique de ces environnements est qu'ils sont basés sur un modèle pédagogique spécifique, qui correspond à un modèle général de la démarche scientifique. Les enseignants conçoivent et organisent l'activité des élèves en suivant le

canevas du modèle, à l'aide d'outils permettant de faire des activités en lien avec chaque étape de ce modèle. Ce modèle est en accord avec des modèles issus de la recherche et avec de nombreux programmes de l'enseignement primaire et secondaire. Or il a l'inconvénient d'offrir peu de flexibilité aux enseignants qui voudraient organiser des activités pédagogiques qui ne sont pas basées sur ce modèle, ce qui est commun au niveau de l'enseignement supérieur.

3.2. Copex-chimie

Copex-chimie (copex-chimie.imag.fr) est un logiciel actuellement utilisé par environ 300 étudiants par an à l'université (niveau licence 1), dans lequel les étudiants doivent déterminer la concentration d'un colorant rouge dans un sirop de grenadine par dosage spectrophotométrique. Pour atteindre cet objectif, les étudiants doivent écrire un protocole expérimental qui peut être prise en compte par le logiciel pour simuler les résultats expérimentaux. Dans cette situation expérimentale, le problème est déjà donné aux étudiants et ils n'ont pas à formuler d'hypothèses. Les étudiants doivent focaliser leur travail sur la conception de l'expérience et l'analyse des données pour conclure. Dans cette situation, ils n'ont pas à réaliser l'expérience au laboratoire car les données sont obtenues par simulation, selon le protocole qu'ils ont écrit.

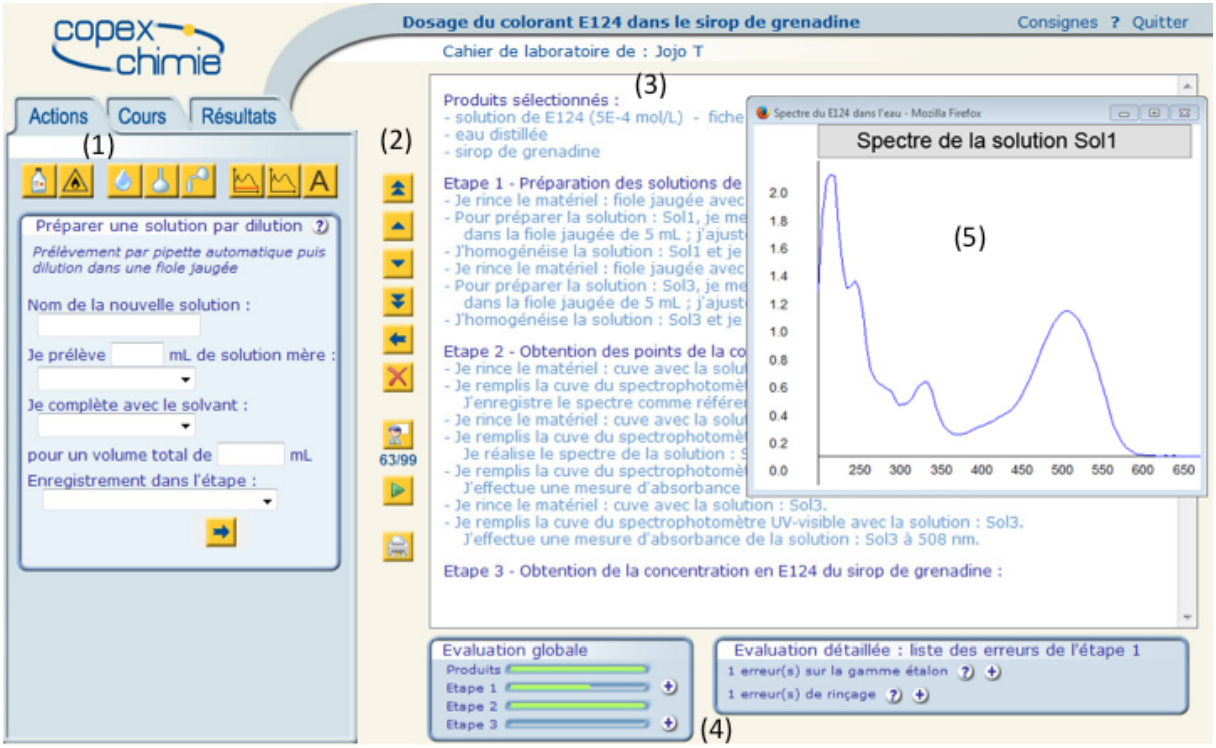


Figure 3. Copies d'écran du logiciel Copex-chimie, avec superposition de fenêtres montrant toutes les fonctionnalités du logiciel.

La Figure 3 illustre les différentes fonctionnalités du logiciel Copex-chimie. L'espace (1) correspond à l'espace de travail de l'étudiant. L'onglet « actions » permet de définir les tâches qui permettent de répondre au problème et qui seront ensuite automatiquement écrites dans le cahier de laboratoire visible dans l'espace (3). Dans l'onglet « cours » l'étudiant accède à des informations organisées en deux parties, intitulées « aspects théoriques » et « aspects pratiques ». L'onglet résultat donne accès à un espace dans lequel l'étudiant peut traiter et évaluer ses résultats (la concentration en E124 dans le sirop). La figure montre le détail de l'onglet action, dans lequel l'action « préparer une solution par dilution » est sélectionnée (cela correspond à la quatrième icône). L'élève doit remplir les champs libres soit en

précisant des valeurs numériques, soit en sélectionnant un texte dans un menu déroulant (sauf pour le nom de la solution).

L'espace (2) contient plusieurs fonctionnalités : les 6 icônes du haut permettent à l'étudiant de modifier le cahier de laboratoire, rempli avec des phrases automatiquement générées, à partir des actions spécifiées par l'étudiant. Il peut modifier le contenu d'une action, déplacer une action dans une étape ou entre étapes ou bien supprimer une action. Deux autres fonctionnalités sont accessibles dans l'espace (2). Il s'agit d'une part d'une demande d'évaluation du protocole écrit dans le cahier de laboratoire, par un tuteur automatique (petit bonhomme), dont le détail de l'évaluation est visible dans l'espace (4). D'autre part, l'élève peut accéder aux résultats simulés issus du protocole (flèche verte), comme par exemple le spectre visible dans l'espace (5). Le chapitre sur les guidages permettra de revenir sur le détail du tuteur et des résultats simulés.

3.3. SCY-Lab

De 2008 à 2012, j'ai été très active dans le projet européen SCY (IP-FP7) « Science Created by You » impliquant douze partenaires à travers l'Europe et le Canada. J'ai été responsable du work package WP 8 qui élabore les contenus pédagogiques de la plateforme SCY-Lab (la plateforme numérique développée dans SCY). Ce projet SCY avait pour objectif le développement d'un environnement informatique novateur pour l'apprentissage des sciences par diverses démarches, telles l'investigation, la conception, le jeu ou la collaboration. Le public visé était les élèves de collège et lycée (12-18 ans). Les élèves engagés dans SCY devaient résoudre une mission dont l'objectif était de répondre à une question liée à des problématiques actuelles de notre société, comme, par exemple : « Comment construire une maison à émission réduite en CO_2 ? ». L'activité de l'élève va alors se dérouler dans le SCY-Lab qui est l'environnement comportant les outils de communication entre acteurs, de régulation de l'activité (planification et contrôle) et de manipulation des données (collecte, modélisation, simulation, représentation...). Deux idées sont au cœur de la création de l'environnement SCY-Lab : d'une part, les élèves doivent être placés dans une situation où leur activité aura les caractéristiques d'une activité scientifique, avec des phases de recherche, de conception, de production, etc., cela afin de favoriser l'acquisition de connaissances liées à la réalité de la démarche scientifique. D'autre part, l'apprentissage est soutenu par des activités de collaboration entre les élèves. SCY-Lab fournit les outils qui rendent possibles ces activités. Ces outils sont intégrés dans les objets à produire (par exemple, outil de modélisation, outil dessin, outil texte, outil de cartes conceptuelles, outil de conception expérimentale). La Figure 4 montre une copie d'écran du SCY-Lab, avec l'une des quatre missions développées.

Sur cette figure, les concepts de *Learning Activity Spaces (*LAS) et *Emerging Learning Objects* (ELO) sont présentés. Deux expérimentations ont été mises en œuvre en France pour tester deux des missions développées lors du projet SCY, néanmoins ce mémoire ne présente pas les résultats de ces expériences. SCY-Lab ayant été développé à des fins de recherche, le projet n'est pas allé au-delà du prototype. De plus les choix technologiques effectués (Java FX) ont rendu son utilisation en classe très complexe et peu pérenne. En revanche dans la partie guidages (chapitre 5) seront exposées les idées que nous avons retenues de SCY pour développer LabNbook.

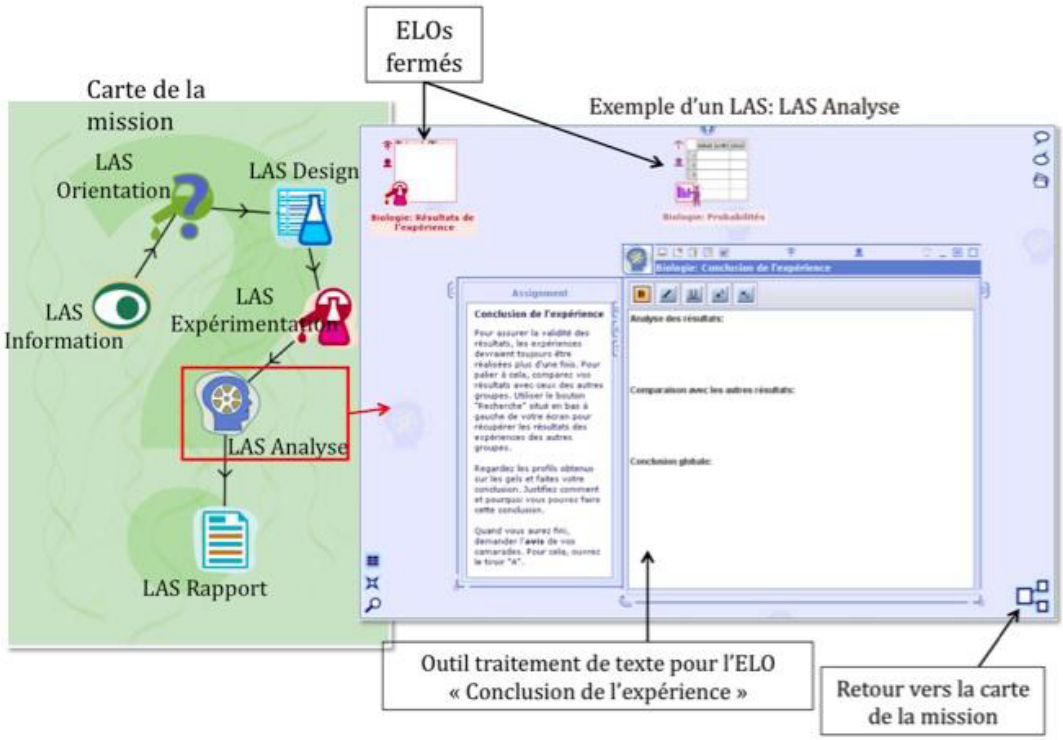


Figure 4. Carte de la mission « laboratoire de police scientifique », présentant l'enchaînement des *Learning Activity Spaces* (LAS) et présentation du « LAS analyse » montrant des *Emerging Learning Object* (ELO).

3.4. LabNbook

LabNbook (http://labnbook.fr/) est une plateforme numérique qui peut être classée dans les LMS (« Learning Management Systems » ou plateforme d'apprentissage en français), avec une spécificité pour les sciences. Cette plateforme est développée avec des technologies web, ce qui rend son utilisation beaucoup plus facile que celle de SCY-Lab. LabNbook comble un besoin non satisfait par les LMS génériques de type Moodle et les environnements de production partagée du type Google Drive. Elle permet aux étudiants de créer et gérer de façon collaborative des cahiers de laboratoire ou des rapports scientifiques, tels ceux rencontrés en TP ou en apprentissage par projet (APP). Nous avons conçu LabNbook comme support numérique pour les enseignants et étudiants engagés dans des formations scientifiques s'appuyant sur des pédagogies favorisant l'apprentissage actif : apprentissage par investigation, projet ou problème.

Dans LabNbook, l'enseignant définit un espace de travail commun pour chaque équipe d'étudiants engagée dans un projet. Il guide les étudiants en structurant leur espace de travail, en spécifiant les contenus à produire, en mettant à disposition consignes et documents, en suivant la progression du travail et en annotant les productions. Les étudiants agissent en collaboration dans l'espace de travail de leur équipe : ils partagent des documents, peuvent produire des contenus à plusieurs et commenter leurs productions. LabNbook embarque quatre outils qui permettent de créer des documents de quatre types, appelés labdocs. Deux d'entre eux ne sont pas spécifiques des sciences : il s'agit d'un outil texte classique et un outil de dessin qui contient des éléments prédéfinis permettant de dessiner des montages expérimentaux (verrerie et composants électriques). Dans cet outil, les étudiants peuvent aussi incorporer une image et l'annoter (comme par exemple, un gel d'électrophorèse ou une image prise au microscope). Les deux autres outils sont des outils innovants, qui émanent du projet SCY. Ils accompagnent les étudiants dans des tâches de conception expérimentale (outil Copex décrit ci-après),

ou de traitement de données (outil Fitex), incluant la visualisation sur graphe XY et la modélisation des données expérimentales.

Pour l'enseignant, LabNbook offre une grande flexibilité, de par le contenu et la structuration de l'activité, mais aussi car la plateforme peut s'adapter à différentes approches pédagogiques. Aucun modèle n'est imposé à l'enseignant, néanmoins nous pensons que LabNbook peut aider les enseignants à transformer leurs enseignements traditionnels vers des pédagogies innovantes. Le support numérique donne à l'enseignant le pouvoir de suivre ses étudiants à distance et de leur faire un retour à n'importe quel moment, qui plus est de façon individualisée pour chaque équipe d'étudiants.

Le contenu peut être écrit totalement par les étudiants, mais l'enseignant peut choisir de pré-remplir des labdocs. La Figure 5 montre un exemple d'interface dans laquelle cinq labdocs sont spécifiés par l'enseignant.

Figure 5. Copie d'écran d'une mission dans LabNbook.

LabNbook s'appelait jusqu'à très récemment LabBook, ce qui explique que les publications jusqu'en 2018 parlent de LabBook. La plateforme a été testée entre 2013 et 2017 dans deux enseignements à l'université, ainsi que dans une dizaine de classes de lycée, ce qui a permis peu à peu de la faire évoluer sur la base des tests effectués et des retours des utilisateurs. Lauréat de l'appel à projet IDEX-Formation 2016 et 2018 de la ComUE Grenoble Alpes, LabNbook est déployée et évaluée depuis 2017 auprès d'environ 3000 étudiants de l'Université Grenoble Alpes (UGA) et de Grenoble-INP. Dans ce projet, nous cherchons à répondre à plusieurs questions : (1) Quels sont les facteurs qui déterminent l'acceptation et l'adoption de la plateforme par les enseignants ? (2) La plateforme LabNbook apporte-t-elle un soutien aux pédagogies innovantes mises en place par les enseignants, voire joue-t-elle un rôle de vecteur de transformation vers des pédagogies où l'étudiant est plus actif dans ses apprentissages au fil des cycles d'enseignement ?

3.5. Copex

Copex est un des outils de LabNbook, il permet aux étudiants de proposer des protocoles expérimentaux. Cinq rubriques sont disponibles pour caractériser le protocole (voir la Figure 6, cadre (1)). Les cadres (2) et (3) donnent le détail des rubriques « question de recherche » et « liste du matériel ».

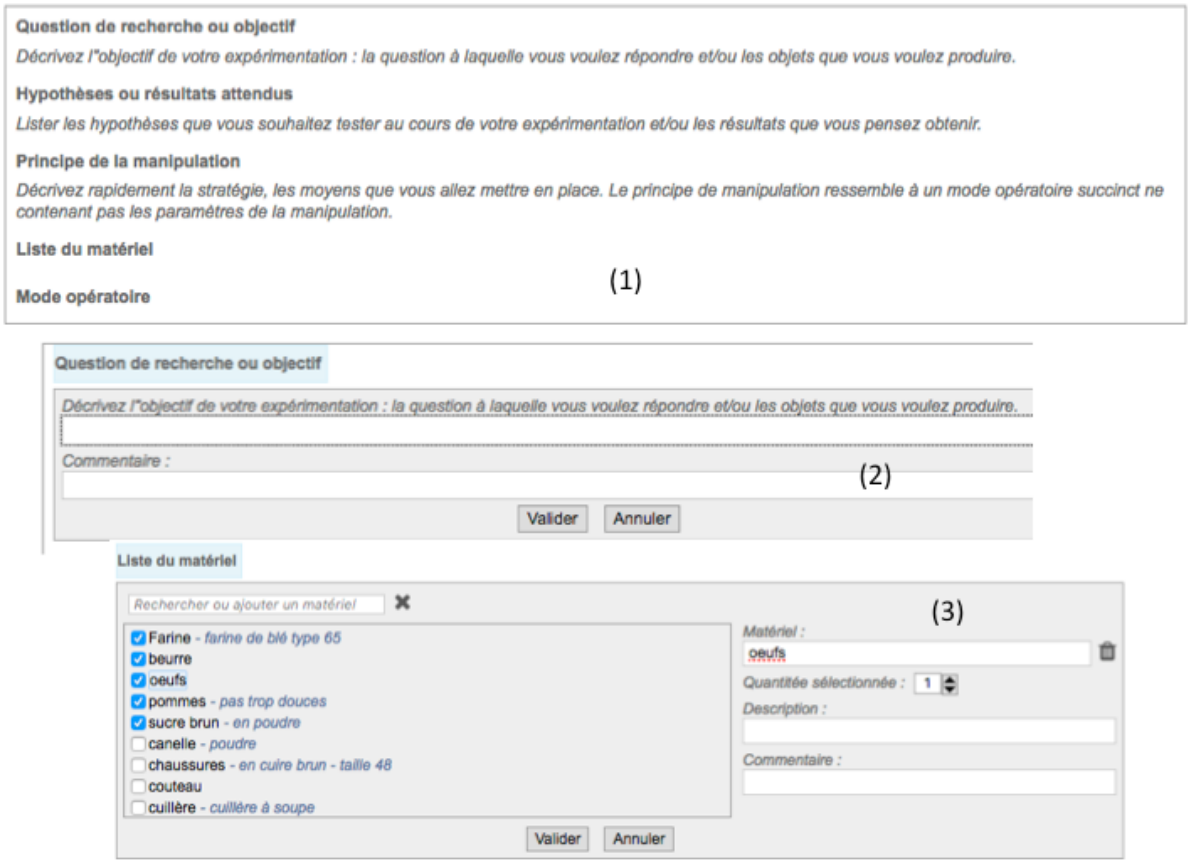


Figure 6. Les cinq rubriques qui composent le protocole expérimental dans Copex avec le détail des rubriques « question de recherche » et « liste du matériel ».

Il est possible de proposer aux étudiants tout ou seulement une partie de ces rubriques.

- Pour les rubriques, questions de recherche, hypothèses et principe de la manipulation, un champ libre permet à l'enseignant ou l'étudiant de décrire ce qu'il a envie. Un espace de commentaire donne la possibilité d'ajouter une information à un autre niveau et apparaitra dans une autre couleur (voir la Figure 7).
- La liste du matériel peut être imposée par l'enseignant, ou pré-remplie par l'enseignant ou bien l'élève doit cocher ce qu'il va utiliser et peut donner des précisions, comme dans le cadre (3) de la Figure 6.
- Le mode opératoire, qui formalise la conception de l'expérience, peut être abordé de différentes façons. La Figure 7 montre un protocole écrit à partir d'étapes et d'actions libellées sous forme de texte libre. Les notions d'étapes et actions seront détaillées dans la partie sur la modélisation du protocole expérimental (voir la Figure 9). Lorsqu'une étape ou une action est ajoutée, il est également possible d'insérer une image ou d'ajouter un commentaire qui apparaît dans une couleur différente.

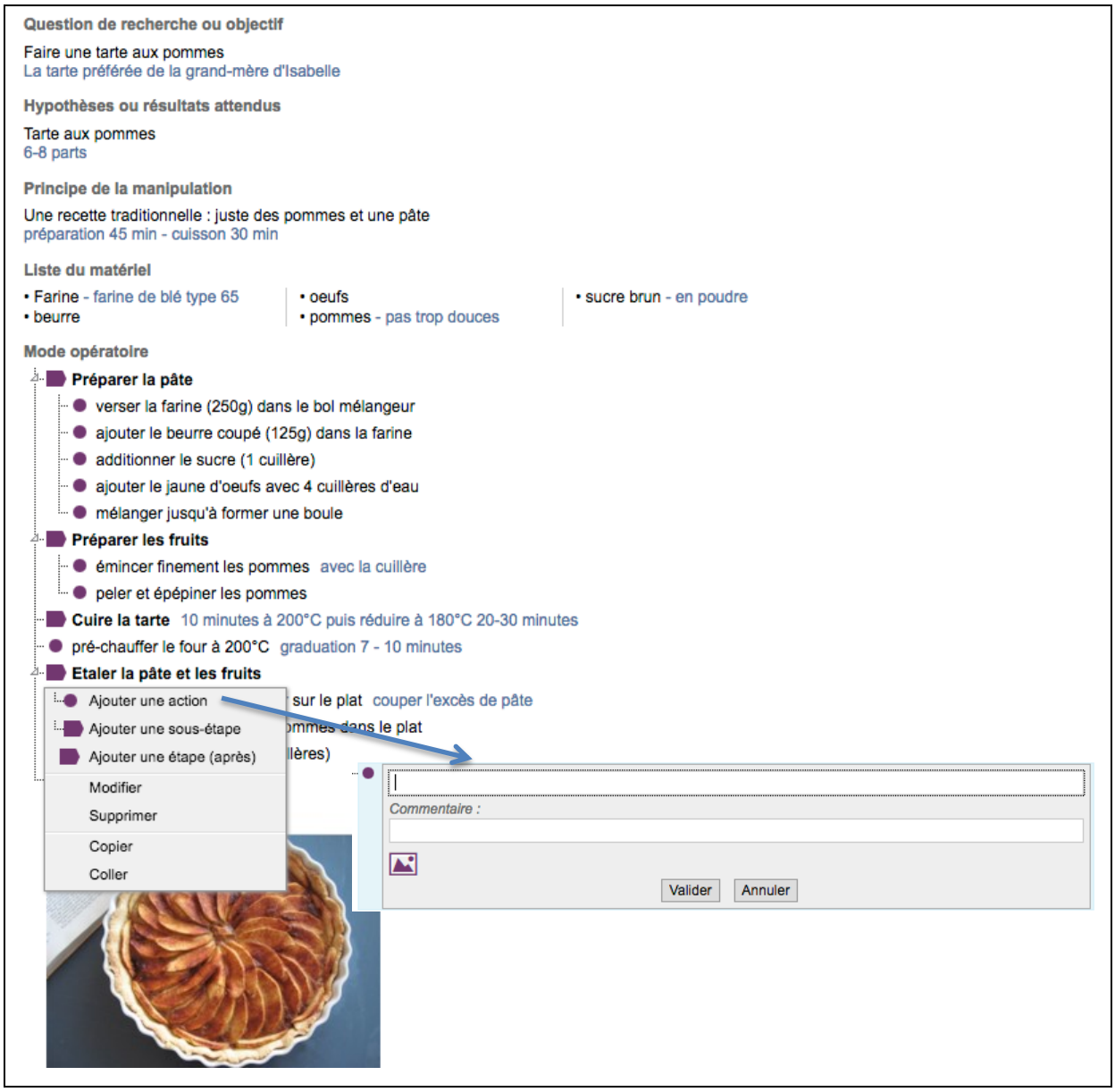


Figure 7. Exemple de protocole produit avec l'outil Copex, pour lequel les étapes et actions sont écrites en texte libre.

Il est également possible d'écrire un protocole expérimental, à partir d'actions avec titre imposé par l'enseignant et contenu libre », ou bien avec des actions qui ont un titre imposé et dont le contenu est déjà structuré. La Figure 8 montre un protocole qui comprend deux étapes. La première étape comprend quatre actions (voir cadre (1)). Le cadre (2) indique que l'étudiant dispose de neuf actions différentes structurées par l'enseignant. Lorsqu'une de ces actions est sélectionnée, le cadre (3) apparaît et l'étudiant doit spécifier les paramètres, en sélectionnant une valeur de paramètre dans une liste à choix, comme le montre le cadre (4), ou bien en écrivant une valeur numérique.

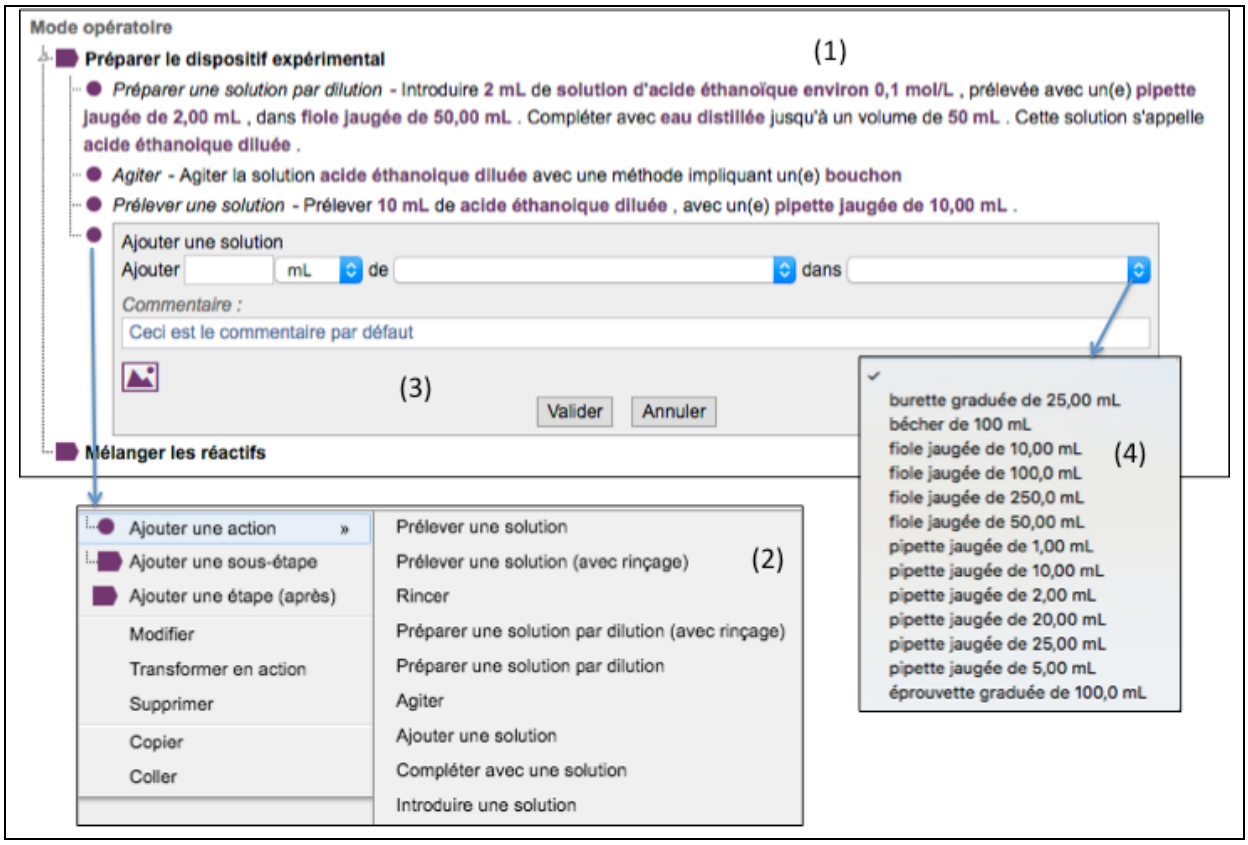


Figure 8. Exemple de protocole produit avec l'outil Copex, pour laquelle les étapes sont écrites en texte libre et les actions sont avec titre imposé et contenu structuré.

3.6. TitrAB

TitrAB (http://titrab.imag.fr/) s'adresse à des élèves de terminale et de formations post bac. Actuellement il est utilisé avec environ 600 étudiants à l'université. Il permet de s'entraîner à concevoir une expérience de titrage acide-base en chimie et à l'exploiter. Seize situations de niveaux différents sont proposées. Dans chacune d'elles, l'étudiant doit déterminer avec précision la valeur de la concentration d'une solution (qui dépend de la situation). Pour cela, il doit fixer les différents paramètres du titrage avant de faire exécuter le protocole qu'il a écrit, par une simulation intégrée. Un tuteur intelligent fournit aux étudiant des messages de rétroaction personnalisés en fonction des erreurs commises.

L'interface du logiciel comporte plusieurs parties ayant chacune une fonction (Figure 9). Le cadre (1) indique le matériel et les solutions disponibles.

La conception de l'expérience se fait par l'intermédiaire du cadre (2). L'élève doit notamment spécifier les solutions à introduire dans la burette graduée et le bécher, leur volume ainsi que la verrerie utilisée. S'il choisit d'effectuer une dilution sur une des solutions, l'élève fait apparaitre un cadre (5) pour paramétrer la réalisation de cette dilution. Ces choix nécessitent d'avoir bien compris ce qu'est l'équivalence d'un titrage et comment est réalisé, en pratique, un titrage pH-métrique.

Une fois les renseignements du cadre (2) indiqués, l'utilisateur clique sur « Faire les ajouts et relever les mesures ». Si les paramètres choisis décrivent une expérience incluse dans le domaine modélisé par la simulation, le logiciel calcule les résultats expérimentaux et affiche, dans le cadre (3), la courbe $pH = f(V)$. L'élève exploite cette courbe pour calculer la concentration de la solution titrée, et la faire valider par le logiciel dans le cadre (4).

L'élève peut faire autant d'essais qu'il le souhaite, mais, pour éviter qu'il ne procède sans raisonner par « essais-erreurs », un score calculé à partir du nombre de tentatives infructueuses (ou erreurs) est indiqué dans le cadre (4).

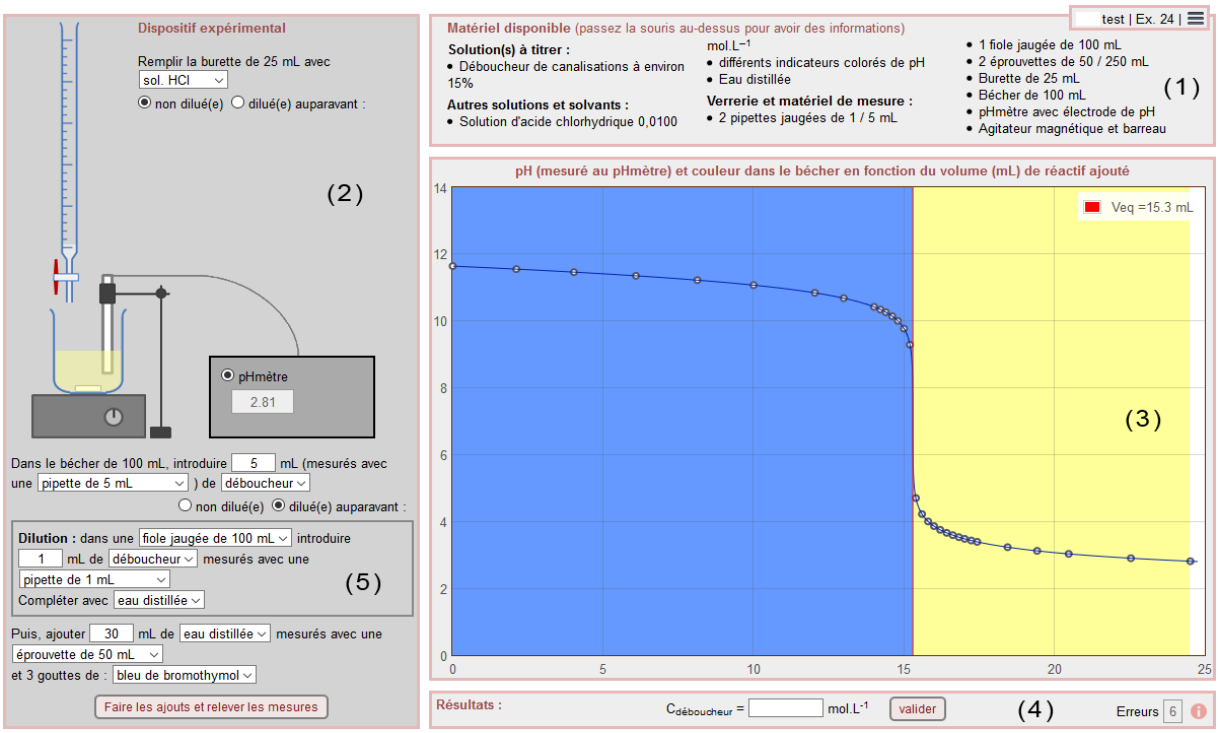


Figure 9. Interface du logiciel TitrAB.

En conclusion, cinq EIAH ont été présentés.

- Copex-chimie est le premier EIAH conçu et développé avec des collègues de l'équipe MeTAH. Il incorpore différents types de guidage pour une activité de conception expérimentale, avec des rétroactions adaptées au travail de l'étudiant. Il a l'inconvénient de supporter une seule activité pédagogique, mais il est toujours utilisé auprès d'étudiants de licence 1.
- SCY-Lab est un EIAH conçu dans le cadre d'un projet Européen qui permet à des élèves de faire des activités guidées, de type démarches expérimentales. Cet EIAH n'a pas été utilisé au-delà du projet de recherche, mais des idées ont été reprises pour concevoir LabNbook.
- LabNbook est un EIAH support d'activités variées, y compris des démarches expérimentales, entièrement configurable par des enseignants. Il facilite la production collaborative d'écrits scientifiques grâce à des guidages adaptés. LabNbook est très utilisé à l'université Grenoble Alpes.
- Copex est un outil de LabNbook qui permet de guider des activités de conception expérimentale.
- TitrAb est le plus récent de nos EIAH qui permet, comme Copex-Chimie, de faire travailler des étudiants spécifiquement sur la conception expérimentale, avec des rétroactions apportées par l'EIAH. TitrAB offre une série de situations expérimentales, qui nous permettent d'approfondir notre travail de modélisation de l'activité d'un apprenant et les guidages associés. Cet EIAH est actuellement utilisé auprès d'étudiants de licence 1.

La suite du mémoire s'appuie sur la présentation de ces EIAH pour introduire d'une part des modèles en lien avec la conception expérimentale, dans le chapitre 4 et d'autre part des résultats d'expérimentations menées avec le guidage d'une activité expérimentale par ces EIAH, dans le chapitre 5.

Chapitre 4 - Modélisation de l'activité de conception expérimentale

La formalisation de la réflexion autour de la conception expérimentale a débuté avec le projet ACI « Education et formation », intitulé CoPEX, dont l'objectif était de proposer une structure pour un EIAH permettant de faciliter l'élaboration de protocoles expérimentaux par des élèves. Pour cela, nous avons d'une part étudié les usages en travaux pratiques (TP) de sciences expérimentales en analysant des documents de TP, et d'autre part nous avons conçu et testé des situations de conception expérimentale dans des classes de terminale scientifique.

Ce travail de recherche a conduit aux résultats suivants, publiés dans Girault et al. (2012) et d'Ham et al. (2019).

- Un modèle pour décrire un protocole expérimental (présenté dans 4.1).
- L'utilisation de ce modèle pour analyser, à travers des manuels de TP, ce qu'attendent des enseignants de leurs élèves, vis-à-vis de la conception expérimentale (présenté dans 4.1).
- Un modèle d'aide pour les enseignants, sous forme de critères, afin d'évaluer la validité d'un protocole écrit par un élève (présenté dans 4.2).
- Un modèle – les « six clés de la conception expérimentale » – qui permet d'expliciter les tenants de la situation de conception expérimentale (présenté dans 4.3).

Dans la suite de nos travaux, nous avons eu recours au modèle praxéologique et à T4TEL, pour structurer davantage la modélisation de l'activité d'élèves qui conçoivent une expérience. Cela correspond aux parties 4.4 à 4.6 de ce chapitre.

4.1. Modélisation du protocole expérimental

4.1.1. Modèle de description du protocole expérimental

La première contribution de ce travail de recherche est la proposition d'un modèle descriptif d'un protocole expérimental (Girault et al., 2012). Nous définissons un protocole comme la description d'une manipulation de données et d'objets réels, dans le but de collecter et traiter des données expérimentales et/ou de construire de nouveaux objets. Pour arriver à ce modèle, nous nous sommes appuyés sur l'analyse de tâches hiérarchiques (Hornsby, 2010) et sur le modèle de l'activité de Leont'ev (1978).

Notre description du protocole (voir la Figure 10) est donc basée d'une part sur le principe de la représentation de tâches par un diagramme de tâches hiérarchiques (Hornsby, 2010). La tâche principale, correspondant à l'activité d'un individu du modèle de Leont'ev, est décomposée en sous tâches (exprimées par leur but) en suivant une analyse descendante dans le diagramme : plus la tâche est en bas, plus la description est détaillée. Par défaut, la lecture d'un tel diagramme s'effectue de gauche en droite : les tâches situées à gauche doivent être mise en œuvre avant les tâches situées à droite du diagramme.

D'autre part, notre modèle s'appuie sur l'activité de Leont'ev (1978) qui nous a permis de distinguer différents niveaux de tâches. Selon ce modèle, pour une personne donnée, une activité (dans notre cas « exécuter une expérience ») peut être décomposée en actions, qui sont elles-mêmes décomposées en opérations. La différence entre actions et opérations est le niveau de conscience du processus pour cette personne. Tandis que les actions sont connectées à des buts conscients, les opérations sont reliées à des comportements routiniers effectués automatiquement.

Dans le diagramme de tâches hiérarchiques que nous proposons, nous mettons en évidence quatre niveaux de tâches.

- La racine du diagramme concerne le niveau « activité », qui correspond ici à l'exécution d'une expérience en particulier, dans le domaine des sciences expérimentales.
- Les niveaux suivants, jusqu'à l'avant dernier niveau de chaque branche, correspondent aux tâches qui structurent le protocole. On les appelle « étapes » ou « sous-étapes ». Ces tâches permettent de rendre la lecture du protocole plus aisée en explicitant des buts intermédiaires de la manipulation expérimentale. Elles révèlent la logique de l'organisation du protocole, en lien avec la stratégie. Ces niveaux ne sont pas décrits par Leont'ev (1978), mais sont un apport du diagramme de tâches hiérarchiques (Hornsby, 2010).
- Le niveau des « actions » représente la part effective du protocole, en lien avec les compétences de l'expérimentateur.
- Le niveau des « opérations » représente les composantes gestuelles (déplacer un objet, appuyer sur un bouton) et cognitive (exécuter un calcul mental, faire un choix) de la manipulation. Ce niveau n'est généralement pas explicité dans les protocoles expérimentaux.

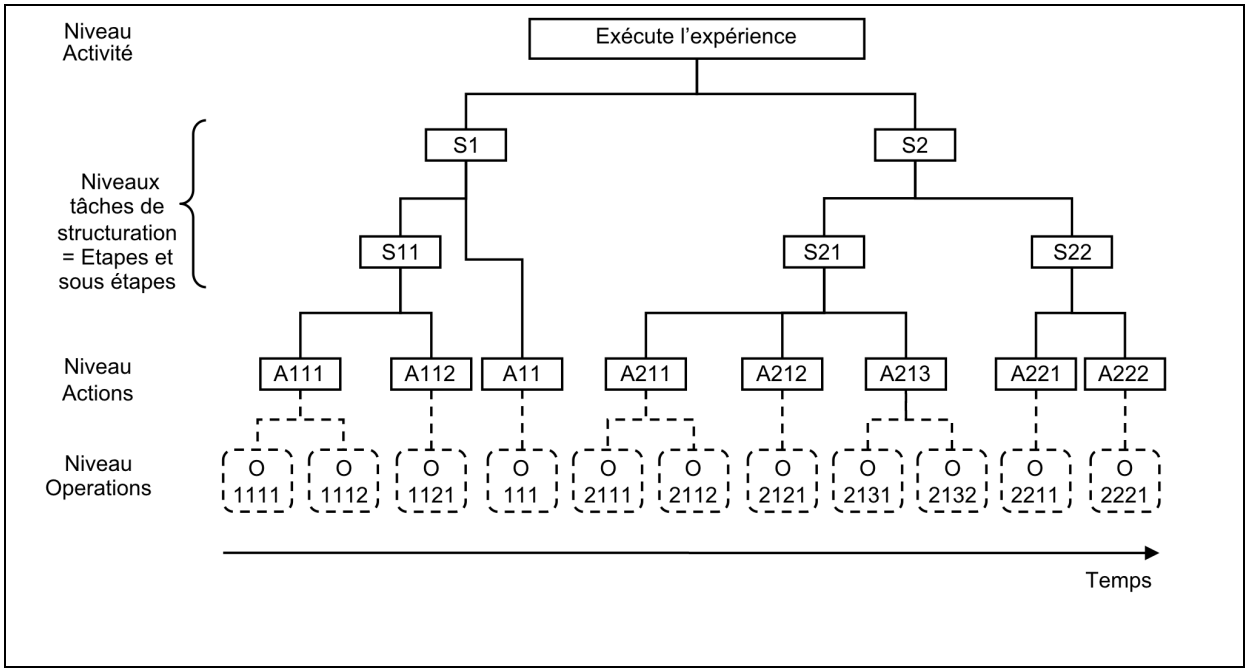


Figure 10. Modèle descriptif d'un protocole générique.

Les niveaux actions et opérations sont illustrés avec un exemple de chimie dont l'activité de l'élève concerne l'enregistrement d'un spectre d'absorbance pour un colorant en solution aqueuse. Si l'action A111 est « faire le blanc du spectrophotomètre », les opérations O1111 et O1112 sont respectivement « Introduire l'eau dans la cuve » et « Presser le bouton « zéro » du spectrophotomètre ». Ces deux opérations sont implicites dans le protocole, sauf si l'expérimentateur est en train de découvrir cela pour la première fois et qu'il est nécessaire de détailler toutes les tâches à réaliser, alors dans ce cas, le niveau opération est considéré comme un niveau action. Si les opérations ne sont pas décrites dans le protocole, et que des paramètres sont associés (ici le paramètre « eau » dans O1111 pour remplir la cuve afin de faire le blanc), alors les paramètres nécessaires à l'exécution des actions devront être indiqués dans les actions associées (ici A111). Cela correspond au principe que chaque tâche peut être définie par les paramètres de ses sous tâches.

Cette première modélisation a suscité un questionnement autour de la différence entre les niveaux action et opération. Si Leont'ev (1978) définit la distinction entre ces deux niveaux, par rapport à la psychologie

cognitive d'un sujet, qu'en est-il lorsque l'enseignement est en jeu ? Quel est le rôle de l'institution scolaire dans cette distinction entre action et opération ? Dans la suite des travaux, nous avons fait évoluer ce modèle pour répondre à ces questions.

Le terme activité est polysémique. Il est employé dans ce document pour décrire soit une activité pédagogique, soit l'activité de l'élève (ce qui est précisé dans ce dernier cas). Par exemple l'activité de conception expérimentale peut être vue du côté de l'enseignant qui propose une activité pédagogique, ou du côté de l'élève qui effectue des tâches pour mettre en œuvre cette activité.

4.1.2. Analyse de pratiques grâce au modèle du protocole expérimental

Lors du projet de recherche ACI Education et Formation (CoPEX), nous avons cherché à comprendre quelle est habituellement l'implication des élèves dans la conception d'expériences. La méthode et les résultats détaillés sont accessibles dans la publication de Girault et al. (2012).

Méthode

Nous avons analysé des documents de TP, en utilisant le modèle de protocole expérimental que nous avons proposé (Figure 10). Nous avons sélectionné des documents donnés aux élèves lors des TP, qui définissent le travail que ces élèves doivent faire et les guident dans ce travail. Nous pensons que les documents de TP sont représentatifs des pratiques usuelles dans l'enseignement des sciences expérimentales et jouent un rôle central dans les activités expérimentales aussi bien au lycée qu'à l'université.

Ce travail a été réalisé par cinq enseignants-chercheurs ainsi que quatre enseignants de lycée, impliqués dans ce projet. Nous avons analysé 39 documents de TP, de quatre disciplines (biologie, chimie, physique et sciences de la terre), de deux universités et trois lycées différents. Ces documents incluent une variété de contenus dans chaque discipline, ainsi qu'une variété de pratiques pédagogiques. Deux niveaux sont concernés : le lycée avec 23 documents de Terminale Scientifique et l'université avec 16 documents des deux premières années de la Licence.

Une grille d'analyse a été mise en place pour identifier les éléments du protocole mis en jeu dans l'activité demandée (question à résoudre, hypothèses à formuler, principe d'expérience, protocole avec les différents niveaux décrits dans la Figure 10), ainsi que l'implication attendue et la latitude laissée aux élèves dans la conception d'un tel protocole. Les enseignants qui ont analysé les documents étaient experts dans le domaine du TP et possédaient un modèle mental du protocole attendu sans qu'ils aient jugé nécessaire de l'expliciter par écrit. Chaque document de TP a été analysé par deux enseignants qui confrontent leurs résultats.

Résultats

Les résultats de cette étude sont détaillés dans Girault et al. (2012). Seuls les résultats les plus intéressants sont reportés ici.

- Le protocole est donné entièrement aux élèves dans seulement un tiers des documents analysés (13/39).
- Quand des tâches manquent dans le document de TP par rapport à un protocole de référence, nous rencontrons deux cas différents :
    - les tâches manquantes sont des tâches de structuration (des étapes ou sous-étapes) dans un tiers des cas ; nous avons rencontré cela dans 12 protocoles sur les 39 analysés et principalement en biologie et physique. Dans ce cas, la stratégie de l'expérience à réaliser n'est pas donnée aux élèves,
    - les tâches manquantes peuvent être uniquement au niveau des actions, des tâches qui décrivent ce que l'élève va faire. Cela apparaît dans 14 protocoles, en majorité en chimie et géosciences.

Nous nous sommes alors demandés dans quelle mesure ces tâches manquantes correspondaient à une activité de conception expérimentale par l'élève. Dans seulement quatre documents de TP (dont trois en biologie, un au lycée et deux à l'université), nous avons considéré qu'il s'agit d'une réelle activité de conception expérimentale, ce qui implique une demande explicite de produire les tâches manquantes, une question à résoudre explicitement posée et une liberté pour compéter le protocole. Néanmoins, il existe des intermédiaires entre l'activité créative de conception expérimentale et le TP recette de cuisine. Ainsi dans beaucoup de cas, il s'agit d'une première étape vers la conception expérimentale où l'élève doit adapter, instancier des protocoles.

De plus, nous avons observé que la description des tâches est souvent accompagnée d'informations supplémentaires d'ordre théorique ou technologique (justification de la tâche, voir la partie suivante sur le modèle praxéologique), mélangées au protocole. Ainsi le protocole lui-même peut être difficilement identifiable pour des élèves. Cela nous a amené à réfléchir à la place de ces informations dans les documents de TP. Cette idée est reprise dans l'outil Copex (voir 5.3.2. Copex (dans LabNbook)).

4.2. Critères d'évaluation de la conception expérimentale

L'analyse des documents de TP montre qu'il n'existe pas une référence commune du protocole expérimental et de la conception expérimentale à laquelle les élèves et les enseignants peuvent se référer. Or, si l'on veut promouvoir l'activité de conception expérimentale par des élèves, il nous a semblé nécessaire de proposer des critères pour aider un enseignant à évaluer la validité d'un protocole écrit par un élève. Cela repose sur une hypothèse de travail que les « objets » difficilement évaluables ont plus de difficulté à vivre dans une institution scolaire.

Nous avons travaillé avec dix enseignants pour comprendre ce qu'était pour eux un « bon » protocole. Nous avons mis en place une méthode complexe basée sur deux types d'entretiens avec des enseignants ayant des profils différents, que nous avons mis en situation (voir méthode et description des critères dans Girault et al. (2012)). A partir du travail produit par les enseignants et de travaux de la littérature, nous avons proposé les critères d'évaluations suivants :

A. Pertinence : la fonction de l'expérience
Pertinence externe entre les hypothèses et les grandeurs à mesurer
Pertinence interne : stratégie de mesure (méthodes et matériels)
Qualité de l'acquisition des données : justesse et fidélité
B. Exécutabilité : l'expérience dans les conditions du laboratoire
Adéquation entre les échantillons et le domaine de validité des méthodes et matériels de mesure
Observation des contraintes matérielles (disponibilité, coût, faisabilité, contrôle des risques)
Observation des contraintes temporelles
C. Communicabilité : la description de l'expérience (le lecteur cible doit être précisé)
Structure : organisation temporelle ou logique des actions du protocole / facilité de lecture
Complétude : le protocole donne-t-il suffisamment de détails pour être exécuté par le lecteur cible ?
Présence du type d'informations adéquats, par exemple il ne doit pas y avoir de calculs ou justifications

Tableau 1. Critères pour évaluer une activité de conception expérimentale et sa description par un protocole.

La communicabilité fait référence au modèle de protocole expérimental que nous avons proposé (Figure 10).

Toujours dans ce même projet CoPEX (ACI « Education et formation »), nous avons conçu avec des enseignants une activité de conception expérimentale dans quatre situations d'enseignement. Nous avons utilisé le modèle de protocole expérimental (Figure 10) pour décrire le protocole complet de l'activité mise en jeu dans les situations d'enseignements proposées. L'utilisation de ce modèle nous a aidé à organiser l'activité des élèves, notamment sur le choix des étapes et actions à la charge de l'élève. De plus, les critères d'évaluation (Tableau 1) nous ont servi à avoir une réflexion critique sur les protocoles élaborés par les élèves.

Le bilan de cette recherche est que pour mener à bien une activité de conception expérimentale, l'enseignant doit repenser l'organisation et le déroulement du TP, à partir des éléments de réflexion suivants.

- La place du modèle scientifique est importante par rapport au TP. Quand la conception expérimentale est à la charge de l'élève, le modèle scientifique ne peut pas être découvert par l'élève lors du TP, il doit être rendu explicite par l'enseignant C'est l'inverse d'une situation d'enseignement où l'élève est guidé et le protocole que l'élève doit exécuter lui permet de (re)découvrir un modèle.
- Il y a nécessité d'un guidage par l'enseignant, en structurant le protocole (ou une partie) à haut niveau (étapes) ou à bas niveau (tâches), lorsque l'activité implique un raisonnement trop complexe pour l'élève, ou lorsque l'utilisation d'une technique est nouvelle.
- Une réflexion autour de la précision en TP est nécessaire lorsqu'elle est à la charge de l'élève. Notamment une réflexion autour du choix du matériel (parmi le matériel disponible) est pertinente. Cela implique de savoir si l'action est faisable avec le matériel choisi ou si le résultat obtenu sera suffisamment exact, ce qui correspond au choix des paramètres des actions du protocole, par les élèves.
- La mise en place d'une situation de communication adaptée peut être intéressante. Par exemple, un échange de protocole entre élèves peut les aider dans la validation de leur protocole. Il est important de bien définir à qui est destiné le protocole, afin d'aider l'élève à savoir à quel niveau de détail il doit écrire (cela permet de savoir quel est le niveau action).

Ces critères d'évaluation sont également intéressants comme outils d'auto-évaluation de la conception expérimentale par les étudiants. Nous avons proposé un enseignement de magistère en Licence 2ème année dont l'objectif était de faire pratiquer la conception d'expérience et réfléchir au processus de conception expérimentale (Wajeman et al., 2015). Les étudiants ont réalisé trois sessions de conception successives sous forme de jeu de rôle : un groupe d'étudiants concepteur concevait une expérience et en rédigeait le protocole qui était ensuite exécuté par un autre étudiant technicien. A partir de leurs expériences successives de concepteur, technicien et observateur silencieux, les étudiants ont mené simultanément une réflexion sur la qualité et le processus de production des protocoles produits. Ils ont ainsi développé des compétences dans l'évaluation d'un protocole expérimental. L'impact le plus évident a porté sur la communicabilité du protocole. Si les étudiants ont approfondi leur questionnement scientifique et amélioré leur organisation du travail, la question de la pertinence scientifique du protocole était la plus difficile à acquérir.

D'autres recherches impliquent ce travail d'auto-évaluation par des élèves de leur protocole expérimental. Yang et Park (2017) ont montré que des élèves produisent de meilleurs protocoles quand on leur fournit au préalable une liste de vérification qui leur permet d'évaluer leur protocole. Cette liste comprend 17 items, organisés en cinq parties : objectif expérimental, faisabilité, paramètres de variables, mesures, caractère concret.

4.3. Modèle descriptif de la conception d'une expérience par des élèves : les « six clés de la conception expérimentale »

Le détail de cette recherche se trouve dans d'Ham et al. (2019). Après avoir analysé les difficultés rencontrées par les élèves lors de la conception expérimentale d'un titrage (situations que l'on retrouve dans le logiciel TitrAB décrit précédemment), il nous a semblé nécessaire de définir les conditions de réussite pour un élève. Ainsi, nous avons proposé un modèle générique qui identifie les points d'achoppement auxquels peuvent se heurter les concepteurs d'expériences novices en la matière. Ce modèle s'adresse aux enseignants qui conçoivent une situation d'enseignement impliquant une conception expérimentale, afin qu'ils mettent en place les conditions favorables pour leurs élèves. Nous avons ainsi proposé les six clés de la conception expérimentale, classées en deux catégories : le contexte de l'expérience et les connaissances à mobiliser.

	Contexte de l'expérience à prendre en compte par les élèves pour élaborer le protocole
1.	Comprendre l'objectif de la manipulation : questions à résoudre / hypothèses à tester
2.	Identifier (et utiliser) les données du problème
3.	Identifier (et utiliser) le matériel disponible
	Connaissances à mobiliser par les élèves pour élaborer le protocole
4.	Connaître les méthodes expérimentales sous-tendant l'expérience à concevoir
5.	Connaître les modèles permettant d'adapter les principes expérimentaux à la situation concrète
6.	Connaître la forme attendue d'un protocole expérimental

Tableau 2. Les six clés de la conception expérimentale.

Pour bien comprendre ces six clés, nous les illustrons par rapport à la situation de titrage, correspondant au logiciel TitrAB, en montrant les liens qui existent entre ces clés et les critères d'évaluation d'un protocole expérimental, sachant que les deux modèles ont des finalités différentes.

Lors de l'élaboration d'un protocole expérimental, il est nécessaire de prendre en compte le contexte de l'expérience.

- Ainsi, comprendre l'objectif de l'expérience est indispensable pour choisir les grandeurs à mesurer afin de résoudre le problème initial. Actuellement dans TitrAB, la seule grandeur qu'il est possible de mesurer est le pH mais nous envisageons de faire évoluer ce logiciel avec des titrages par conductimétrie. Ainsi, l'élève aura à choisir la grandeur à mesurer en fonction des données du problème. Cette clé est en lien avec la pertinence externe proposée dans les critères d'évaluation de la conception expérimentale.
- Il faut aussi savoir identifier, pour pouvoir les utiliser, toutes les données du problème et cela même si les valeurs fournies sont approximatives : dans la situation testée avec TitrAB, les élèves doivent sélectionner et utiliser la valeur approximative de la concentration de la solution titrée afin de mettre en œuvre leur raisonnement. L'utilisation d'une valeur approximative a déconcerté la plupart des élèves engagés dans l'activité, et d'autant plus que cette valeur est celle à déterminer avec précision au cours de l'expérience. Il n'est pas facile de lier cette clé aux critères d'évaluation, car elle fait écho au critère d'exécutabilité (adéquation entre les échantillons et le domaine de validité…), mais aussi à la pertinence (qualité de l'acquisition des données).
- La prise en compte du matériel disponible est un autre élément indispensable pour élaborer le protocole d'une expérience. Cela permet de faire aussi bien des propositions de manipulation que

des contrôles sur les manipulations proposées. Par exemple, dans les situations proposées dans TitrAB, les élèves doivent choisir le volume de la prise d'essai à partir des volumes des pipettes jaugées disponibles, puis vérifier que le volume choisi est compatible avec le volume de la burette disponible. Il existe un lien direct entre cette clé et le critère d'évaluation d'exécutabilité (observation des contraintes matérielles).

Pour réussir à élaborer un protocole expérimental, il est également nécessaire de mobiliser des connaissances.

- Tout d'abord, les élèves doivent avoir une idée assez précise des méthodes expérimentales à mettre en œuvre. Dans notre situation, ces méthodes concernent le titrage, la notion d'équivalence, l'utilisation de la verrerie en fonction de la précision souhaitée et la préparation de solutions par dilution. Cette clé fait écho au critère de pertinence interne.
- La connaissance des modèles de la chimie correspond à des connaissances théoriques, telles que la réaction chimique ou la notion de concentration. Ces connaissances permettent d'adapter les méthodes expérimentales à l'expérience répondant effectivement au problème posé. Cette clé n'est pas évaluée directement par les critères d'évaluation proposées, même si ces connaissances sous-tendent la pertinence.
- Finalement, il est nécessaire de savoir quels éléments doit contenir un protocole et comment le structurer pour assurer sa lisibilité et sa compréhension. Cela renvoie directement au critère de communicabilité des critères d'évaluation de la conception expérimentale. Cependant dans TitrAB, cela est pris en charge par l'EIAH. Ce guidage implique que les élèves n'ont pas à leur charge la question de forme du protocole. Néanmoins cette clé est importante lors de l'utilisation du logiciel Copex.

Ce modèle des six clés peut être utile à l'enseignant en amont de l'élaboration d'une activité de conception expérimentale proposée aux élèves, mais aussi pour faire un contrôle une fois la situation d'enseignement élaborée, afin de vérifier que toutes les conditions sont réunies pour favoriser la réussite des élèves. Des guidages peuvent être envisagés par l'enseignant si les conditions ne sont pas réunies.

Après avoir proposé ces différents modèles, des questions subsistent.

- Dans le modèle descriptif d'un protocole générique, il n'est pas facile de définir les niveaux actions et opérations pour un apprenant donné, si nous ne prenons pas en compte l'institution scolaire.
- Ce modèle de protocole générique ne prend pas en compte les savoirs, que les apprenants doivent mobiliser lors d'une activité de conception expérimentale, comme indiqué dans les six clés de la conception expérimentale.

Nous avons alors fait appel à un autre cadre, le modèle praxéologique, pour aller plus loin dans notre modélisation, en espérant apporter des réponses aux questions qui demeurent.

4.4. Modèle praxéologique et T4TEL

Le modèle praxéologique (Bosch & Chevallard, 1999) a été utilisé dans différentes recherches autour de la conception expérimentale, avec trois étudiants de master et lors de la thèse de Catherine Bonnat (2017). Au fur et à mesure des travaux, la modélisation proposée initialement pour la conception expérimentale s'est enrichie avec les notions de types de tâches de conception, de variables et de praxéologies personnelles en lien avec le modèle T4TEL, détaillé ci-après.

4.4.1. Présentation du modèle T4TEL

Les recherches menées au sein de l'équipe de recherche MeTAH s'inscrivent dans le domaine des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) où la modélisation des connaissances et savoirs est une question centrale. C'est dans ce contexte et afin de disposer d'un modèle

didactique pouvant être implémenté dans un EIAH, qu'a été développé le cadre de référence T4TEL[1] (Chaachoua, 2019). Le cadre T4TEL s'inscrit dans la Théorie Anthropologique du Didactique (TAD) (Chevallard, 1992, 1999) et plus spécifiquement dans l'approche praxéologique (Bosch & Chevallard, 1999) : ce cadre représente une formalisation et une extension du modèle praxéologique.

Dans le modèle praxéologique, toute activité consiste à accomplir une *tâche* t (d'un certain type T) au moyen d'une *technique* τ, justifiée par une *technologie* θ, qui est à son tour justifiable par une *théorie* Θ. Une activité peut donc être décrite à l'aide d'une organisation [T ; τ ; θ; Θ] appelée *praxéologie* (ou *organisation praxéologique*) qui se compose de deux blocs.

- Un bloc *pratico-technique* [T ; τ] (la *praxis* ou le savoir-faire)
- Un bloc *technologico-théorique* [θ ; Θ] (le *logos* ou le savoir).

Un des premiers enjeux de T4TEL est de disposer d'un modèle permettant de décrire les éléments d'une praxéologie, de rendre compte des relations entre les éléments d'une praxéologie et de décrire une structuration entre les différentes praxéologies. Un deuxième enjeu est de construire des fonctions didactiques pour produire différents services comme diagnostic et guidage qui font partie des objectifs des travaux que nous menons.

Une caractéristique du cadre T4TEL est de prendre en compte la relativité institutionnelle des savoirs dans la modélisation des savoirs, c'est-à-dire le fait que les activités des enseignants et apprenants et leurs relations avec les savoirs sont liées à l'institution dans laquelle ils prennent place. En effet, un savoir n'existe pas "in vacuo" dans un vide social : tout savoir apparaît, à un moment donné, dans une société donnée, comme ancré dans une ou des institutions (Chevallard, 1989). Si le modèle praxéologique permet de décrire l'organisation du savoir au sein d'une institution et les activités des sujets attendues par l'institution, un apport de T4TEL dans la TAD est d'intégrer les comportements non attendus par l'institution, en particulier les erreurs des élèves par l'introduction de la praxéologie personnelle (Croset & Chaachoua, 2016).

Il existe plusieurs types de praxéologies sur lesquelles nous nous appuyons dans nos études : la praxéologie de référence, la praxéologie institutionnelle et la praxéologie personnelle.

- La praxéologie de référence prend en compte plusieurs dimensions (épistémologique, didactique et cognitive). Elle sera utilisée pour décrire l'activité de conception expérimentale.
- La praxéologie institutionnelle permet de rendre compte ce qui est attendu par une institution. Elle apporte donc des informations sur le rapport institutionnel.
- La praxéologie personnelle intègre des techniques et des technologies apprises et qui ne sont pas nécessairement valides. Elle permettra de décrire les erreurs des élèves lors de l'élaboration du protocole de titrage. Cela sera décrit dans une partie ultérieure.

Pour la suite du travail, il est nécessaire de détailler trois apports de T4TEL, par rapport aux praxéologies. Je résume des travaux de Chaachoua (2019).

4.4.2. Le lien entre technique et type de tâches

Dans T4TEL, la notion de type de tâches est première, comme en TAD, mais il existe une forme de dualité avec la notion de technique.

Ce qu'observe un chercheur dans une institution donnée ce sont des tâches. Un travail de modélisation permet de rattacher et organiser les tâches autour d'un même type de tâches, en prenant en compte les objets communs sur lesquels porte l'action et les moyens communs d'accomplir les tâches.

[1] T4TEL : *T4* renvoie au quadruplet praxéologique (Type de tâches, Technique, Technologie, Théorie) et *TEL* pour Technology Enhanced Learning

Un apport de T4TEL réside dans la caractérisation et la formalisation d'un type de tâches. Pour aller plus loin par rapport à la praxéologie, dans T4TEL une technique est décrite par un ensemble de types de tâches appelés ingrédients de la technique. Ce découpage permet de mieux situer les difficultés des élèves dans la mise en œuvre d'une technique au niveau des sous-tâches qui composent la technique.

Chaque type de tâches qui est ingrédient d'une technique a lui-même une ou plusieurs techniques qui s'expriment à leur tour par un ensemble de types de tâches. Chaachoua (2019) a alors introduit la notion de type de tâches *élémentaire* pour exprimer qu'à un niveau donné de la description on arrête le processus. Un type de tâches est *élémentaire* si l'institution ou le chercheur du domaine considère qu'il n'est pas nécessaire d'expliciter la ou les techniques pour ce type de tâches. Au niveau de l'institution le statut élémentaire est souvent réglé au niveau du contrat didactique et qui évolue dans le temps : ce qui devait être explicité à un moment donné ne l'est plus à un autre moment. Au niveau du chercheur il peut désigner des types de tâches comme élémentaires dans la construction de son modèle. Ce choix est souvent lié aux questions de recherche.

4.4.3. Types de tâches et variable dans T4TEL

Dans T4TEL un type de tâches T est décrit par un verbe d'action et un complément, représentés par T (Verbe d'action, Complément). Le verbe d'action caractérise le genre de tâches, comme « Calculer », « Comparer ». Le complément précise sur quoi porte l'action. Cependant, le complément peut être défini selon différents niveaux de granularité, du spécifique au générique et, pour prendre en compte ces relations entre le générique et le spécifique, T4TEL introduit les notions de système de variables et de générateur de types de tâches (Chaachoua, 2019). Un exemple sera montré dans la partie 4.5.3.

Les variables permettent de formaliser et structurer des types de tâches, nous en distinguons deux.

- Les variables cognitives. Par le choix de valeurs de variables différentes, il est possible de provoquer des changements de connaissance optimale.
- Les variables didactiques. Ce sont celles qui peuvent être fixées par l'enseignant parmi les variables cognitives.

Les variables didactiques peuvent être considérées avec plusieurs points de vue.

- Point de vue épistémologique : le changement d'une valeur modifie l'éventail des techniques possibles. C'est en lien avec le savoir de référence.
- Point de vue institutionnel : les contraintes et conditions de l'institution restreignent les valeurs possibles des variables.
- Point de vue cognitif : il permet de considérer les erreurs des élèves, en lien avec les techniques erronées des praxéologies personnelles.

Les variables ont plusieurs fonctions.

- Elles permettent de générer des sous-types de tâches en jouant sur les valeurs d'une variable.
- Elles caractérisent les portées des techniques.
- Elles caractérisent les conditions et contraintes institutionnelles.
- Les valeurs des variables didactiques peuvent être enrichies de valeurs supplémentaires pour rendre compte des praxéologies personnelles des élèves.

T4TEL permet donc de produire des sous-type de tâches (T') du type de tâches T, avec les conditions suivantes : T' est un type de tâche lui-même et est un sous-ensemble de T.

4.4.4. Les praxéologies personnelles dans T4TEL

La problématique de la modélisation des connaissances d'un apprenant n'apparait pas comme une sensibilité-clé au sein de la TAD, mais elle apparait pourtant dans les fondements de la théorie à travers

la notion de rapport au savoir. En effet, dans l'un des textes fondateurs de cette théorie, Chevallard (1989) introduit la notion de *rapport institutionnel* à un objet *O* et de *rapport personnel* d'un individu *X* à l'objet *O*.

Cette question est centrale dans les recherches sur la modélisation des connaissances de l'apprenant (Croset & Chaachoua, 2016) puisque le même modèle permet de prendre en compte, aussi bien les connaissances correctes, qu'elles soient attendues ou non par l'institution, que les connaissances erronées. Ce choix présuppose que les erreurs sont la manifestation de connaissances à modéliser, indépendamment d'un paradigme d'apprentissage dans lequel nous pourrions nous placer.

Utiliser un même modèle permet de mesurer l'écart éventuel entre le rapport institutionnel à un savoir et le rapport personnel d'un sujet en position élève dans cette institution à ce même savoir. Croset et Chaachoua (2016) ont choisi le modèle praxéologique dont l'utilisation a été étendue à la description du rapport personnel. Ils appellent *praxéologie personnelle* le quadruplet d'organisation praxéologique de l'activité d'un sujet institutionnel constitué de quatre composantes.

- Un type de tâches personnel est l'ensemble des tâches que le sujet perçoit comme similaires, provoquant chez lui l'application d'une technique. Si deux types de tâches personnels sont distincts, alors nécessairement leurs techniques personnelles respectives sont distinctes. Le découpage en types de tâches personnel ne correspond donc pas nécessairement à celui de l'institution.
- Une technique personnelle utilisée par l'élève permet de résoudre un seul type de tâches personnel. Elle peut être erronée, correcte, légitimée par l'institution de référence ou non. Elle doit présenter une certaine stabilité dans son utilisation pour être considérée comme technique de résolution : elle n'acquiert sa légitimité pour un élève donné que si elle est régulièrement utilisée par cet élève. Nous évitons ainsi de considérer comme une technique personnelle, des erreurs d'étourderie ou de dérapage ponctuel.
- Une technologie personnelle, explicite ou non, gouverne et légitime l'utilisation de praxis personnelles. Souvent un simple déficit de technologie institutionnel peut être à même d'expliquer des techniques personnelles erronées.

Voici un résumé des éléments issus des praxéologies et de T4TEL qui vont nourrir nos travaux.

- L'articulation entre savoir-faire et savoir.
- La modélisation décrite par un ensemble de types de tâches (T) et des types de tâches élémentaires.
- Les notions de générateur de types de tâches (GT) et variables. A un type de tâches T, on associe un GT qui permet de générer des sous-types de tâches de T en jouant sur les valeurs de variables. Ainsi GT = T + système de variables.
- Il existe une hiérarchie dans les types de tâches avec des types de tâches et des sous-types de tâches, le premier étant plus générique et le second plus spécifique.
- Les différents types de praxéologies dont les praxéologies personnelles.

4.5. Illustration de l'utilisation de T4TEL dans une activité de conception expérimentale (cas de TitrAB)

Cette partie permet d'illustrer la modélisation par types de tâches en apportant une dimension nouvelle au modèle T4TEL, à savoir les types de tâches de manipulation et les types de tâches de conception (4.5.1), puis l'intérêt de cette modélisation pour sélectionner les tâches dévolues aux élèves (4.5.2). Les notions de générateur de types de tâches et variables sont aussi illustrées dans TitrAB pour présenter les 16 situations pédagogiques proposées dans l'EIAH (4.5.3). Pour terminer, une modélisation des erreurs

des élèves est proposée en s'appuyant sur les praxéologies personnelles (4.5.4). Un large partie de ces résultats a été publiée dans Girault et al.(2018).

4.5.1. Types de tâches de manipulation et types de tâches de conception

Types de tâches de manipulation

Bien que T4TEL soit issu de travaux en didactique des mathématiques, ce cadre semble bien adapté pour décrire l'activité d'élèves concevant une expérience en sciences expérimentales. En effet, la praxéologie a été développée dans la TAD pour modéliser toute activité humaine (Chevallard, 1999).

Dans le cadre d'une activité de conception expérimentale, l'élève imagine l'expérience et rédige le protocole décrivant cette expérience avant de réaliser la manipulation au laboratoire. Le protocole est décrit par un ensemble de tâches de manipulation. Cela correspond à ce que nous avions décrit avec le modèle du protocole expérimental (Figure 10), avec une organisation différente du diagramme, dans laquelle les étapes et actions sont représentées par des tâches, et plusieurs niveaux hiérarchiques si c'est pertinent. Une nouveauté concerne la modélisation en types de tâches, qui permet de rendre la tâche plus générale. La technique de manipulation τ_m modélise l'activité manipulatoire de l'élève, qui est l'activité principale de l'élève dans un TP de type « recette de cuisine ». Cette technique fait appel à des types de tâches que nous dénommons T_m, « types de tâches de manipulation ».

La Figure 11 montre l'articulation entre les tâches du protocole et des types de tâches de manipulation.

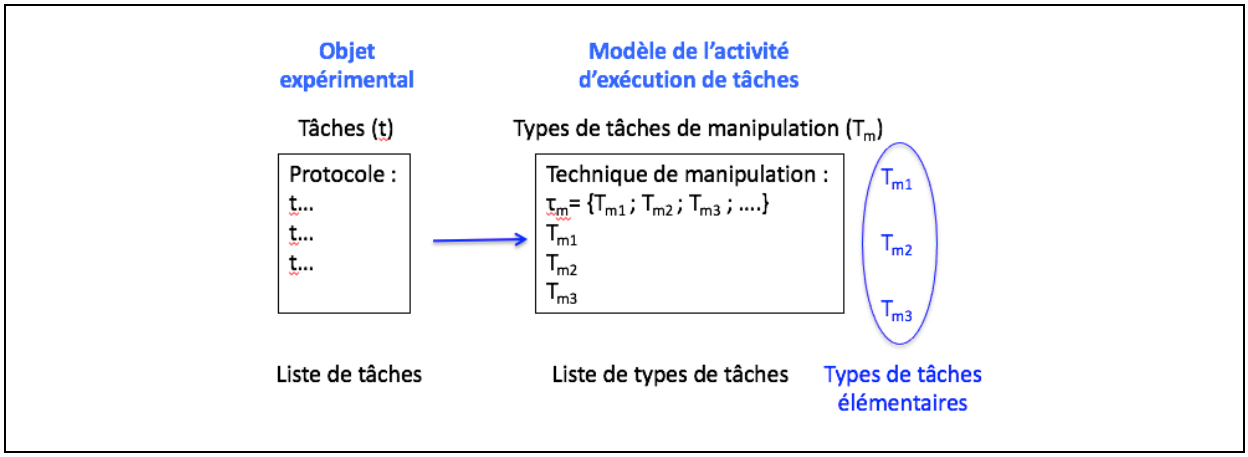


Figure 11. Modèle praxéologique avec des types de tâches de manipulation.

T4TEL est illustré à travers une activité de dilution lors d'un titrage, situation courante au lycée et à l'université et qui correspond à une partie de l'activité de l'élève dans TitrAB (Figure 9, cadre 5).

Voici un exemple relativement simple permettant d'illustrer l'utilisation de la praxéologie. Il s'agit d'un protocole de dilution qui est mise en œuvre dans certains exercices de TitrAB. Le protocole de dilution (cas d'un facteur de dilution f = 10), correspond à un ensemble de tâches, décrites dans la première colonne du Tableau 3.

Ce tableau met en parallèle le protocole de dilution et les types de tâches de manipulation correspondants, soulignant la proximité entre les deux. Le protocole, en décrivant précisément la succession des tâches à effectuer, constitue une instance de la technique de dilution. Les types de tâches de cette technique de dilution sont décrits par un verbe d'action et un complément, comme le protocole. Par exemple, la tâche « Prélever 10 mL de la solution d'acide éthanoïque 1 mol.L^{-1} avec une pipette jaugée de 10 mL » relève du type de tâches de manipulation T_{m3} « Prélever un volume V de solution à diluer S avec une verrerie de prélèvement P ». Les types de tâches de manipulation décrites dans la colonne de droite ont le statut de type de tâches élémentaire dans l'institution étudiée. Cela renvoie aux actions et opérations décrites dans notre modèle initial.

Protocole	Types de tâches de manipulation
tâche t : Préparation par dilution de 100 mL de solution d'acide éthanoïque de concentration 0,1 mol.L^{-1} à partir d'une solution mère de concentration 1 mol.L^{-1}. Technique de la tâche : - Rincer une pipette jaugée de 10 mL avec la solution d'acide éthanoïque 1 mol.L^{-1}. - Rincer une fiole jaugée de 100 mL avec de l'eau distillée. - Prélever 10 mL de solution d'acide éthanoïque 1 mol.L^{-1} avec une pipette jaugée de 10 mL. - Délivrer ces 10 mL dans la fiole jaugée de 100 mL. - Compléter la fiole jaugée avec de l'eau distillée. - Boucher et agiter par retournement.	Type de tâches T_m : Préparer par dilution un volume V_D de solution S_D de concentration C' à partir d'une solution mère S_M de concentration C. Technique du type de tâches T_m (τ_m) : - T_{m1} Rincer la verrerie de prélèvement (type G_P ; volume V_P) avec la solution à diluer S_M. - T_{m2} Rincer la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C) avec le solvant s. - T_{m3} Prélever le volume V_M de la solution à diluer S_M avec la verrerie de prélèvement (G_P, V_P). - T_{m4} Délivrer la solution prélevée (V_M) dans la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C). - T_{m5} Compléter à V_D avec le solvant s dans la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C). - T_{m6} Mélanger la solution S_D.

Tableau 3. Correspondance entre tâches et types de tâches de manipulation

Types de tâches de conception

Dans une activité de conception expérimentale, la praxis de manipulation ne suffit pas pour décrire l'activité de l'élève, en particulier l'activité de conception expérimentale qui produit le protocole. En effet pour être capable de produire les tâches de son protocole, l'élève doit effectuer un travail cognitif souvent complexe, en mobilisant des connaissances, comme par exemple savoir déterminer le volume de la solution à titrer à partir d'un calcul des quantités de matière à l'équivalence, enjeux des apprentissages visés.

Nous avons modélisé cette activité de l'élève par des types de tâches que nous appelons types de tâches de conception (T_C) (voir la Figure 12). En nous appuyant sur les types de tâches de manipulation, nous identifions tout ce qui demande une décision de la part de l'élève dans le protocole : un type de tâches de conception interroge soit la technique à laquelle appartient le type de tâches de manipulation considéré (décision d'inclure ce type de tâches de manipulation dans la technique), soit le type de tâches de manipulation lui-même. Dans ce cas, le type de tâches de conception explore les décisions pour chaque paramètre apparaissant dans le complément du type de tâches de manipulation.

Nous allons centrer notre étude sur les types de tâches de conception, enjeu didactique d'apprentissage, compte tenu de notre hypothèse, que la conception expérimentale doit permettre à des apprenants de faire des liens entre des techniques de laboratoire et des concepts scientifiques associés à ces techniques. Ainsi, à chaque T_{mi} nous allons étudier le(s) type(s) de tâches T_{Ci} correspondant.

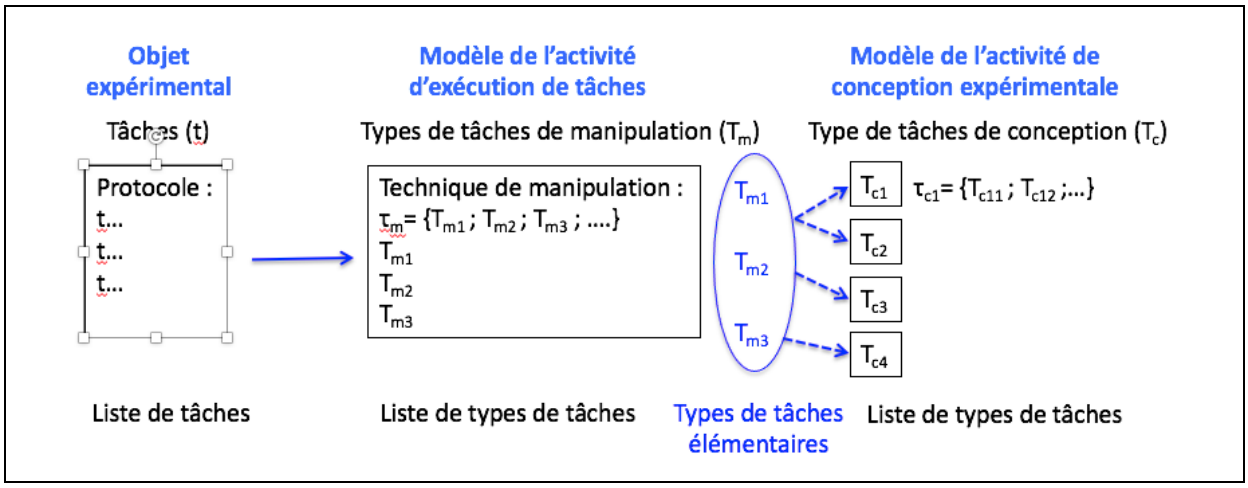


Figure 12. Modèle praxéologique avec des types de tâches de manipulation et des types de tâches de conception.

Le Tableau 4 détaille les types de tâches de conception associés à un des types de tâches de manipulation T_{m3}, *Prélever le volume V_M de la solution à diluer S_M avec la verrerie de prélèvement (G_P, V_P)*. Les types de tâches de conception concernent le choix des valeurs des paramètres suivants : volume de solution V_M, nature de solution S_M, type de verrerie G_P et volume de la verrerie V_P.

Les types de tâches de conception sont justifiés par un logos qui relie l'activité de l'élève à des notions théoriques. Ainsi l'activité de conception expérimentale permet à l'élève de mobiliser ou d'établir des liens entre théorie et expérience, ce qui n'est pas nécessaire quand l'élève doit seulement mettre en œuvre un protocole.

Types de tâches de manipulation (T_m)	Types de tâches de conception (T_C)
T_{m3} : Prélever le volume V_M de la solution à diluer S_M avec la verrerie de prélèvement (G_P, V_P).	T_C : Concevoir T_{m3} Choisir d'inclure T_{m3}. Choisir les valeurs des paramètres de T_{m3}. $\tau_C = \{T_{C1} ; T_{C2} ; T_{C3} ; T_{C4}\}$ • T_{C1} Choisir la nature S_M de la solution à prélever. • T_{C2} Choisir le volume V_M de la solution S_M. • T_{C3} Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M. • T_{C4} Choisir le volume V_P de la verrerie G_P utilisée pour prélever S_M.

Tableau 4. Association entre un type de taches de manipulation et des types de tâches de conception.

La praxéologie du type de tâches de conception T_{C3} est présentée dans le Tableau 5. Il s'agit d'un exemple facile à aborder mais il faut être conscient que T_{C2} est plus riche d'un point de vue apprentissage de la chimie et correspond au point central de la conception expérimentale dans le cas d'un titrage. Cette complexité du titrage est détaillée dans les publications de Berthet et al. (2015) ainsi que d'Ham et al. (2019). Dans une partie suivante sur les variables et les exercices dans TitrAB, la complexité de T_{C2} est illustrée.

Par rapport à T_{C3}, un élève qui mobilise correctement ses connaissances, identifie la pipette jaugée comme le type de matériel adapté pour prélever avec précision.

Type de tâches de conception	T_{C3} Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M
Technique	Prendre une verrerie de précision pour prélever S_M *(paramètre attendu : pipette jaugée).*
Technologie	La quantité de matière de l'espèce diluée doit être connue avec précision, car le problème à résoudre (titrage) nécessite d'obtenir une valeur de concentration de la solution diluée la plus précise possible.
Théorie	Notion de concentration. Incertitude de mesure.

Tableau 5. Exemple de praxéologie pour un type de tâches de conception.

Un travail de modélisation de l'activité de l'élève lors d'un titrage a permis de décrire une praxéologie de référence qui reprend l'ensemble des types de tâches de manipulation et des types de tâches de conception associés (détaillé dans l'annexe 1). Par rapport au modèle du protocole expérimental (Figure 10), la praxéologie de référence possède deux avantages. L'activité de manipulation par l'élève est décrite en termes de types de tâches, ce qui lui donne un caractère plus général, permettant de s'intéresser à une classe de situations d'apprentissage et non à une situation isolée. Dans le cadre de l'apprentissage, l'introduction des types de tâches de conception permet de décrire la conception expérimentale quant aux activités de l'élève qu'elle implique (les techniques) : cela permet d'identifier les choix et décisions que les élèves doivent prendre pour élaborer un protocole. La partie logos de la praxéologie permet d'identifier les savoirs associés qui sont pertinents.

4.5.2. Sélection des tâches dévolues à l'élève

De façon générale, la praxéologie de référence, telle que nous la proposons, est un outil utile pour organiser l'activité de conception expérimentale et définir précisément le travail de l'élève. En effet, dans une telle activité, l'élève peut avoir à charge de concevoir tout ou partie de l'expérience. Ainsi, la praxéologie de référence et les types de tâches de conception associés permettent de choisir les types de tâches de manipulation dont la conception est dévolue aux élèves. Ce choix devrait être fait par rapport aux objectifs d'apprentissage visés.

Dans le cas de TitrAB, la praxéologie détaillée dans le Tableau 5 indique des technologies et des théories qui sont des objectifs importants d'apprentissage en classe de terminale et en première année universitaire, en lien avec la connaissance de la verrerie et la gestion des incertitudes de mesure. Dans la tâche « Prélever 10 mL de la solution d'acide éthanoïque 1 mol.L^{-1} avec une pipette jaugée de 10 mL », il est du ressort de l'élève de spécifier le paramètre verrerie G_P en choisissant la pipette jaugée comme valeur de ce paramètre. La conception de certaines tâches de manipulation ne sont pas dévolues aux élèves dans TitrAB : c'est le cas du rinçage du matériel (T_{m1} et T_{m2} dans le Tableau 3), pour lequel les connaissances en jeu sont considérées comme non prioritaires au regard des objectifs d'apprentissage dans TitrAB.

4.5.3. Conception des situations d'enseignement

Cette partie décrit comment les variables didactiques aident à concevoir les différents exercices de TitrAB.

Tout d'abord, il est possible de replacer la tâche proposée dans TitrAB dans un problème plus générique. Cela me permet de décrire un générateur de type de tâches avec ses variables :

GT = Doser une espèce chimique en solution (V_1, V_2)

- V_1 = propriété chimique de l'espèce (ex : acide-base, redox…)

  En fonction de la valeur de V_1 plusieurs techniques sont possibles et correspondent à des types de dosage différents. Par exemple, si la variable V_1 prend la valeur acide-base, alors la technique associée est un dosage par suivi de réaction, aussi appelé titrage.

- V_2 = matériel disponible (ex : indicateur coloré, pH-mètre, conductimètre…)

  En fonction de la valeur de V_2 plusieurs techniques sont possibles et correspondent à des méthodes de mesure différentes. Par exemple, si V_2 prend la valeur pH-mètre, la technique associée est une mesure du pH.

Dans TitrAB, les variables V_1 et V_2 prennent respectivement les valeurs V_1=acide-base et V_2=pH-mètre. Cela conduit au sous-type de tâches *T'1 = Titrer une espèce acide-base par pH-métrie.*

Seize exercices sont proposés qui relèvent tous du même type de tâches T'1.

La technique de T'1 inclut le type de tâche *T'a : Faire un prélèvement de la solution S contenant l'espèce à doser.*

C'est en définissant des variables attachées au type de tâches T'a que nous pouvons proposer des exercices différents. Le but est de complexifier les exercices afin de provoquer des changements de connaissances. Nous avons ainsi produit un nouveau générateur de type de tâches GT'.

GT' = faire un prélèvement de la solution S contenant l'espèce à doser (V'_1, V'_{1a}, V'_{1b}, V'_2, V'_3, V'_4, V'_5, V'_6).

Ainsi, des exercices de niveaux différents correspondent à des valeurs différentes pour les variables suivantes :

- V'_1 = rapport des concentrations des solutions titrantes et titrées, qui dépend de V'_{1a} et V'_{1b}
  - V'_{1a} = valeurs des concentrations des solutions titrantes
  - V'_{1b} = valeurs des concentrations des solutions titrées
- V'_2 = nombre de solutions titrantes proposées
- V'_3 = nature des solutions titrantes proposées (toutes identiques, natures différentes)
- V'_4= type de matériel proposé dans une liste d'un exercice de TitrAB
- V'_5= valeur des volumes de pipette jaugées proposés
- V'_6= valeur des volumes de fiole jaugée proposés

Les variables permettent de jouer sur la difficulté de la tâche de l'élève lors de différents types de tâches de conception.

Si nous revenons aux T_C décrites dans le Tableau 4, la complexité des types de tâches T_{C2} et T_{C4} est calculée à partir du nombre de valeurs que peuvent prendre certaines variables. Il existe un nombre de possibilités pour l'élève (combinatoire) qui repose sur :

Nombre de valeurs pour V'_{1a} -> dépend de V'_2 et V'_3 : nombre de solutions titrantes de même nature proposées.

Nombre de valeurs pour V'_5 -> nombre de pipettes mises à disposition (de volumes différents).

Nombre de valeurs pour V'_6 -> nombre de fioles jaugées mises à disposition (de volumes différents).

Les caractéristiques des exercices, avec les valeurs de variables sont résumées dans l'annexe 2.

La variable V'3 rend la tâche de conception « choisir la nature du titrant » (ne fait pas partie de l'exemple décrit dans la partie sur les types de tâches de conception) plus difficile pour l'étudiant. Ce choix de

variable repose sur des erreurs identifiées a priori. Ainsi l'élève choisit le paramètre solution parmi une liste à choix qui comporte des « leurres » correspondant à des techniques erronées. Cela renvoie à des praxéologies personnelles erronées, pour lesquelles des parcours d'apprentissage pourraient être proposés.

De la même façon, la variable V'4 rend le type de tâches de conception T_{C3} intéressant car il y a plusieurs types de matériel parmi lesquels l'élève doit choisir et qui renvoient à des praxéologies personnelles.

La partie *Prospectives* permettra de revenir sur cette modélisation, pour discuter comment elle peut être exploitée dans l'évolution de TitrAB.

4.5.4. Les erreurs des élèves et praxéologies personnelles

Nous avons modélisé les erreurs possibles des élèves grâce au cadre T4TEL. Ainsi, si on reprend le type de tâches de conception T_{C3} « Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M », le logiciel propose dans la liste de matériel, différentes valeurs pour le paramètre « verrerie » qui obligent l'élève à faire un choix. Les valeurs de paramètres disponibles pour les élèves dans TitrAB ont été choisies avec une intention didactique, à partir de la praxéologie de référence et des praxéologies personnelles. Le Tableau 6 détaille les praxéologies personnelles pour T_{C3}.

T_C	Technique personnelle	Technologie personnelle
T_{C3} : Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M.	Prendre un bécher ou une éprouvette graduée.	Absence des technologies de référence (cf le Tableau 3). Ou La précision n'est pas nécessaire pour prélever la prise d'essai. Ou Toutes les verreries ont la même précision.
	Prendre une fiole jaugée.	La fiole jaugée est une verrerie adaptée pour un prélèvement*.

Tableau 6. Praxéologies personnelles pour un type de tâches de conception (T_C). *une fiole jaugée permet de contenir un volume précis mais pas de le délivrer.

Ainsi, cet exemple montre l'impact de la variable V'_4 (type de matériel proposé) dans la définition des exercices d'une part et dans l'interprétation possible des erreurs des élèves d'autre part.

- Quand il y a un menu déroulant, plusieurs valeurs de paramètres sont proposées aux élèves, des valeurs correctes et des valeurs erronées. Elles sont choisies à partir de la praxéologie de référence et des praxéologies personnelles. Dans ce cas, il existe une correspondance entre une variable didactique (type de matériel) et les praxéologies personnelles. La réponse attendue qui correspond à la praxéologie de référence est une pipette comme matériel pour prélever une solution à diluer. Néanmoins, si l'élève sélectionne une des autres propositions de matériel (éprouvette graduée, fiole jaugée), nous pouvons penser que son raisonnement est erroné, ce que nous modélisons par une technologie personnelle. Nous approfondirons cela dans le chapitre suivant à propos des questions de diagnostic et de guidage.
- Quand il y a un champ libre dans lequel l'élève doit rentrer une valeur numérique, il n'y a pas de correspondance directe avec les praxéologies personnelles. Cela pourrait être le cas si un menu déroulant était proposé avec plusieurs valeurs numériques parmi lesquelles l'élève devait choisir. Dans TitrAB, le volume de la solution à prélever est un champ libre. Pour parvenir à trouver ce volume, l'élève doit mettre en œuvre une technique complexe dont la détermination du volume est la finalité. Néanmoins la trace de ce raisonnement n'est pas disponible dans le logiciel.

Pour conclure ce chapitre, la synthèse de nos divers travaux menés sur la modélisation de l'activité de conception expérimentale a été présentée. Quelle est la validité des modèles proposés ? Une amorce de réflexion est proposée ci-dessous.

- Le modèle des démarches expérimentales (chapitre 2) a été efficace pour décrire la démarche expérimentale enseignée dans une école d'ingénieur (travail non présenté dans ce mémoire, Wajeman et al., 2021).
- Le modèle pour décrire un protocole expérimental a été utilisé dans un premier temps pour analyser des documents de TP, afin d'identifier la place du protocole dans des pratiques d'enseignement, puis concevoir des activités de conception expérimentale. Ce modèle sous-tend également la conception des logiciels Copex-chimie et TitrAB (dans une moindre mesure), dans la façon dont le protocole est structuré.
- Le modèle d'aide pour les enseignants, sous forme de critères, afin d'évaluer la validité d'un protocole écrit par un élève. La validation s'est déroulée à deux niveaux. Tout d'abord avec des enseignants avec lesquels nous avons élaboré puis validé ces critères, puis auprès d'étudiants dans une situation d'enseignement dans laquelle les critères ont permis l'auto-évaluation de protocoles expérimentaux écrits par eux-mêmes.
- Un modèle descriptif de la conception d'une expérience par des élèves, les « six clés de la conception expérimentale » qui s'adresse à des concepteurs de situations d'enseignement impliquant une conception expérimentale, afin qu'ils mettent en place des conditions favorables. Une validation de ce modèle a été effectuée dans un travail de recherche itératif avec une enseignante, et a permis des restructurations successives de l'activité proposée aux élèves, conduisant à une meilleure réussite des élèves à l'activité de conception expérimentale proposée. Il sera intéressant de valider ce modèle dans d'autres contextes d'enseignement.
- Les modèles praxéologiques et T4TEL, ainsi que le complément apporté par les types de taches de manipulation et de conception. L'apport de nos travaux permet de valider ces modèles grâce à leur utilisation dans d'autres disciplines que les mathématiques (pour lesquelles ils ont été pensés), ainsi que leur utilité pour concevoir l'EIAH TitrAB (ce dernier point sera étendu dans la partie prospectives), ainsi que pour concevoir des situations d'enseignement dans l'outil Copex de LabNbook (développé dans la partie 5.3.2).

Chapitre 5 - Guidage des démarches expérimentales et de la conception expérimentale par un EIAH

Ce chapitre débute par une synthèse de la littérature (partie 5.1) sur les guidages des démarches expérimentales, dont le guidage par un EIAH. Dans la suite de ce chapitre, les études que nous avons menées sont présentées en les classant selon le type de guidage, fixe ou adaptatif, et également selon le type d'activité pédagogique que ces guidages soutiennent : la pratique d'une démarche expérimentale avec des guidages fixes uniquement (partie 5.2) et la conception d'expériences avec des guidages fixes (partie 5.3) ou avec des guidages adaptatifs (partie 5.4). Pour chaque EIAH, les guidages mis en place et les évaluations menées avec des apprenants sont détaillés.

Dans le chapitre précédent, le modèle praxéologique a été présenté, modèle qui a été introduit peu à peu dans nos travaux de recherche. Si ce modèle n'a pas été utilisé dans les travaux concernant le guidage de la démarche expérimentale (avec l'utilisation des plateformes SCY-Lab et LabNbook), il est présent dans le guidage de la conception expérimentale. Ce mémoire propose une relecture partielle de certains travaux publiés sans modèle praxéologique, pour inclure des éléments de ce modèle.

5.1. Synthèse de la littérature sur le guidage des démarches expérimentales avec un EIAH

Il existe une littérature abondante sur ce thème. Le guidage est un terme général qui englobe beaucoup de types de supports différents, pour apporter une aide à un apprenant effectuant une activité. Comme de nombreux travaux sur les guidages utilisent le terme d'étayage, cette partie débute par une présentation de l'étayage tel qu'il a été introduit initialement pour la résolution de problèmes, dans un contexte d'enseignement sans EIAH (5.1.1). La suite de cette partie bibliographique concerne des situations d'apprentissage impliquant un guidage par un EIAH, en débutant par la présentation d'un type d'étayage par un EIAH, à savoir les systèmes de tuteurs intelligents (5.1.2), avant de présenter diverses possibilités de guidage par un EIAH dans une activité de démarche expérimentale (5.1.3). Cette synthèse de la littérature se termine par la présentation de travaux testant l'efficacité de guidages pour des apprenants, que ce soit dans le cadre d'une activité de démarche expérimentale (5.1.4) ou plus spécifiquement une activité de conception expérimentale (5.1.5). Cette dernière section présente des types de guidages spécifiques de la conception expérimentale et pour certains des travaux de recherche, des résultats sur l'impact de ces guidages sur l'activité ou sur les apprentissages associés.

5.1.1. Introduction sur un type de guidage : les étayages

Cette partie n'est pas spécifique des démarches expérimentales et ne concerne pas les EIAH. Néanmoins, il est important de replacer le guidage dans un contexte historique. Wood et al. (1976) furent les premiers à proposer la notion d'étayage (*scaffold* en anglais) pour caractériser les dispositifs de la situation qui permettent la réussite des élèves, réussite qu'ils ne pourraient atteindre sans cet étayage, sans pour autant altérer le potentiel d'apprentissage porté par la situation. Dans leur étude, ces auteurs décrivent six stratégies d'étayage que l'adulte utilise pour accompagner temporairement l'enfant qui apprend à résoudre un problème. Il s'agit d'enfants de 3 à 5 ans qui résolvent un problème de construction avec des cubes. Parmi ces stratégies, trois sont d'origine motivationnelle, *recruitment, direction maintenance and frustration control*, (traduites respectivement par enrôlement, maintien de l'orientation, et contrôle de la frustration) et trois sont d'ordre cognitif, *reduction in degrees of freedom, marking critical features and demonstration* (traduites respectivement par réduction du degré de liberté, signalisation de caractéristiques prédominantes, démonstration ou présentation de modèles) (Wood et al., 1976 ; Belland et al., 2013). Un aspect fondamental du processus d'étayage est le *fading* introduit

par Collins et al. (1989) qui est une diminution progressive de l'étayage, que l'on trouve en français sous le nom de désétayage. Lorsqu'un enseignant met en place un étayage, il prend en charge une partie de la tâche que l'élève ne peut gérer entièrement. Cela implique un effort de résolution de problème coopératif entre l'enseignant et l'élève, dans le but que l'élève assume le plus possible de la tâche par lui-même, dès que possible. Un prérequis d'un tel étayage est le diagnostic précis des difficultés ou du niveau de compétences de l'élève à un moment donné, puis la mise en place d'une tâche intermédiaire au niveau de difficulté de l'élève pour mener à bien la tâche visée. Le désétayage consiste à enlever graduellement les supports jusqu'à ce que l'élève réalise la tâche par lui-même.

L'idée d'étayage a été ensuite associée à la zone proximale de développement (ZPD) de Vygotsky (1978), qui différencie la part d'une tâche qu'un apprenant peut accomplir seul et ce qu'il ne peut accomplir sans assistance d'un adulte.

Van de Pol et al. (2010) indiquent que l'étayage étant une intervention dynamique de l'enseignant, adaptée aux progrès continus d'un apprenant, l'aide apportée par l'enseignant dépend fortement des caractéristiques de la situation, comme le type de tâche à résoudre et les réponses de l'étudiant. Par conséquent d'une situation à l'autre, les étayages ne se ressemblent pas. Ces auteurs proposent un modèle conceptuel qui s'adresse aux étayages dans les interactions enseignant-élève. Ce modèle de l'étayage comporte trois caractéristiques : *contingency, fading* et *transfer of responsibility.*

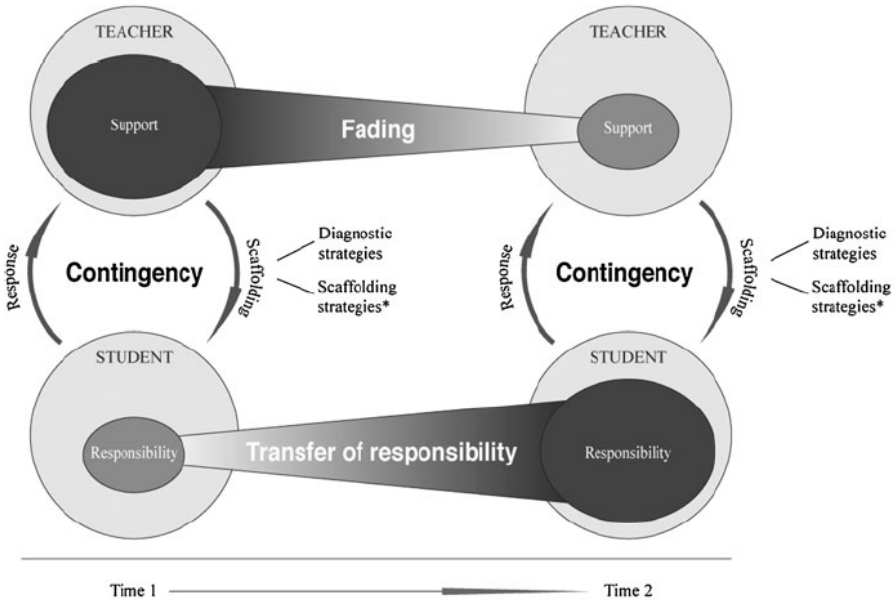


Figure 13. Modèle conceptuel de l'étayage proposé par van de Pol et al. (2010). Les stratégies d'étayage sont une partie du processus de l'étayage et sont décrites par la suite (Tableau 7).

Ce que ces auteurs appellent *contingency* se réfère à une aide réactive, adaptée, différentiée. L'aide de l'enseignant doit être adaptée au niveau en cours de la performance de l'élève. Ensuite, pendant que l'enseignant diminue son support (désétayage), il peut également transférer la responsabilité à l'élève pour que l'apprenant prenne de plus en plus le contrôle de son apprentissage. Van de Pol et al. (2010) ont proposé également un cadre pour analyser les stratégies suivies par les enseignants, en faisant la distinction entre les outils ou moyens pour étayer (comment l'étayage est effectué) et les buts ou les intentions de l'étayage (ce qui est étayé) (voir le Tableau 7). Ce cadre d'analyse est issu de deux classifications de la littérature : celle de Wood et al. (1976) avec ses six fonctions d'étayage, ainsi que celle de Tharp et Gallimore (1988) qui proposent six moyens d'aider la performance : *modeling, contingency management, feeding back, instructing, questioning, and cognitive structuring*. A partir de ces deux classifications, van de Pol et al. (2010) proposent cinq intentions d'étayages qui sont organisées

en trois catégories : les étayages qui supportent chez l'apprenant, (i) les activités métacognitives, (ii) les activités cognitives et (iii) l'affect. Les cinq intentions sont *Direction Maintenance* (maintien de l'orientation), *Cognitive structuring* (structuration cognitive, dans laquelle l'enseignant fournit des explications et des structures d'idées qui organisent et justifient), *Reduction of degrees of freedom* (réduction des degrés de liberté), *Recruitment* (Enrôlement), *Contingency management / frustration control* (Gestion des éventualités, qui concerne la facilitation de la performance de l'élève par un système de récompense et sanctions / contrôle de la frustration). Ces auteurs distinguent par ailleurs six moyens de soutenir l'activité d'apprentissage chez les élèves. Quatre sont issus des travaux de Tharp et Gallimore (1988) et deux moyens ont été ajoutés (*Hints* et *Explaining)* : *Feeding back* (un retour à l'apprenant sur sa performance), *Hints* (indications, suggestions par l'enseignant, qui ne donne ni la solution, ni des détails dans ce cas), *Instructing* (l'enseignant dit ce qu'il faut faire ou explique comment quelque chose doit être fait et pourquoi), *Explaining* (informations plus détaillées ou clarification), *Modeling* (cela correspond à la catégorie démonstration ou présentation de modèles de Wood et al., 1976) et *Questioning* (poser des questions à l'élève qui impliquent une réponse nécessitant un apport cognitif de la part de l'élève).

Intentions d'étayage		**Moyens d'étayage**
Supporter les activités métacognitives des étudiants	• Maintien de l'orientation	• Retour sur la performance • Suggestions • Explications • Explications détaillées • Démonstration • Questionnement
Supporter les activités cognitives des étudiants	• Structuration cognitive • Réduction des degrés de libertés	
Supporter l'affect des étudiants	• Enrôlement • Gestion des éventualités / contrôle de la frustration	

Tableau 7. Cadre d'analyse d'étayages, proposé par van de Pol et al. (2010), qui distingue les intentions et les moyens mis en œuvre pour l'étayage.

Il existe une synthèse de la littérature faite par Shute (2008) qui s'intéresse aux rétroactions formatives, un type d'étayage, dans les EIAH. Une rétroaction formative est définie comme une information communiquée à l'apprenant suite à un diagnostic de son activité, avec l'intention de modifier sa pensée ou son comportement dans le but d'améliorer l'apprentissage. Il s'agit d'un papier intéressant qui décrit de nombreux types de rétroactions formatives, en fonction du contexte d'enseignement et d'apprentissage et des caractéristiques de l'apprenant. Dans cette synthèse, le terme d'étayage correspond à la définition originale car les rétroactions envisagées impliquent un désétayage, contrairement à ce qui est indiqué dans la littérature de la même époque. Néanmoins, cette synthèse ne s'intéressant pas spécifiquement aux situations d'enseignement en lien avec la démarche expérimentale, elle ne sera pas prise en compte dans la suite de ce mémoire.

La notion d'étayage a été utilisée, et dans une certaine mesure adaptée, dans les situations d'apprentissage par investigation soutenues par des environnements informatiques. C'est l'objet de la suite de ce chapitre. Dans ce contexte, l'étayage se réfère à la façon dont l'outil informatique peut aider l'apprenant plutôt que l'aide vienne seulement de l'enseignant ou des pairs. Nous présentons un type d'étayage par un EIAH, dénommé « système de tuteur intelligent ».

5.1.2. Un type d'étayage par des EIAH : les systèmes de tuteurs intelligents (STI)

Dans le cadre des EIAH, un étayage peut être pris en charge, éventuellement en complément d'un enseignant, par un système de tuteurs intelligents. Connus sous le nom de *Intelligent Tutoring Systems* (ITS) en anglais, il s'agit d'un champ de recherche dont l'objectif est de fournir des services de tuteurs artificiels qui soutiennent l'apprentissage. Initialement, les STI ont été développés pour soutenir l'apprentissage dans des domaines qualifiés de bien définis (*well-defined domains*), c'est à dire un

domaine dans lequel il existe une façon systématique de déterminer quand une solution proposée est acceptable. Peu à peu, de nombreux travaux se sont tournés vers la conception de STI pour les domaines mal définis (*ill-defined domains*) qui sont par définition les domaines qui ne sont pas bien définis (Fournier-Viger et al., 2010). Néanmoins, les caractéristiques d'un domaine mal défini sont multiples et complexes, puisque dans le cas de résolution de problèmes, il faudrait tenir compte à la fois du domaine et des tâches demandées à l'élève qui peuvent être plus ou moins bien définis (Mitrovic & Weerasinghe, 2009) (Aleven et al., 2011). De façon générale, une démarche expérimentale correspond à des problèmes pour lesquels il n'existe pas une seule réponse attendue et ainsi un STI supportant une démarche expérimentale sera associé à un domaine mal défini (Fournier-Viger et al., 2010).

Quatre parties composent un STI (Nkambou et al., 2010) : (i) le module expert, qui correspond au modèle de connaissance, (ii) le modèle de l'élève sur lequel va s'appuyer le diagnostic de l'état des connaissances de l'élève, (iii), le module pédagogique, qui correspond à la stratégie de guidage, qui peut être matérialisée par un tuteur artificiel, (iv) l'interface utilisateur qui donne accès à des éléments du domaine de connaissance à travers différentes formes possibles d'environnements d'apprentissage. Dans la suite de ce chapitre, les différentes composantes d'un STI seront évoquées quand ce sera pertinent, mais le focus sera principalement sur la stratégie de guidage correspondant à l'un des quatre modules d'un STI.

Des études ont mis l'accent sur les inconvénients possibles de l'utilisation de tuteurs artificiels. Lors de la résolution d'exercices de programmation, si le nombre de resoumissions n'est pas restreint, certains apprenants sont tentés de résoudre des exercices en appliquant une stratégie de type essai erreur. Ils utilisent un grand nombre de réitérations sans réfléchir à la source des erreurs. Dans le but d'éviter ce comportement, Karavirta et al. (2006) proposent de restreindre le nombre de soumissions autorisées. Selon Baker et al. (2004) des élèves utilisent le STI avec des stratégies non orientées vers l'apprentissage, qu'ils nomment « gaming the system » et traduit ici par 'détourner le système'. L'élève cherche à réussir en exploitant les propriétés du système plutôt qu'en cherchant à utiliser ses connaissances pour répondre de manière appropriée au problème posé. Il s'agit d'une stratégie systématique d'essai-erreur dans laquelle l'élève demande de l'aide au tuteur de façon rapide en faisant des essais systématiques, par exemple en proposant des nombres croissants lorsqu'une valeur est requises ou en cliquant sur chaque réponse d'un QCM l'une après l'autre. Selon Vaessen et al. (2014), les élèves évitent souvent d'avoir recours au tuteur ou alors l'utilisent d'une manière abusive ou inefficace. Cela est dommage car un STI peut améliorer l'apprentissage selon ces auteurs. Ils concluent leur étude en proposant aux concepteurs de logiciel de restreindre l'accès au tuteur.

Par rapport aux possibilités offertes par l'accompagnement d'un apprenant par un EIAH, le terme de guidage étant plus général, il permet de rendre compte de davantage de situations d'accompagnement. La suite de cette partie s'intéresse à divers guidages par des EIAH dans des situations de résolution de problèmes, de type démarche expérimentale.

5.1.3. Le guidage par des EIAH dans des activités de démarche expérimentale

Des auteurs questionnent l'efficacité de l'enseignement par investigation. Par exemple Kirschner et al. (2006) ont exprimé le peu de crédit qu'ils accordaient aux méthodes pédagogiques dérivées du constructivisme lorsqu'elles ne sont pas guidées. Plus récemment, des évaluations internationales à grande échelle indiquent une corrélation négative entre les résultats aux tests de connaissances scientifiques et un enseignement par investigation (Léna, 2018 ; Cairns & Areepattamannil, 2019). Des travaux de Aditomo et Klieme (2020) ont réexaminé cette question et sont arrivés à la conclusion que l'enseignement par investigation peut être associé à un apprentissage efficace lorsqu'il est associé à un guidage par les enseignants. Ce guidage peut être associé à l'utilisation d'outils informatiques qui soutiennent l'apprentissage par investigation (Bell, Urhahne, Schanze & Ploetzner, 2010).

Une spécificité du guidage par un EIAH est qu'il n'est pas évident de séparer l'étayage, de l'outil en lui-même. Cela pourrait expliquer pourquoi le désétayage n'est pas toujours mis en œuvre dans le cadre des EIAH. De nombreux travaux dans les EIAH parlent d'étayage, sans qu'il y ait nécessairement le désétayage associé.

Puntambekar et Hubscher (2005, p. 1) soutiennent que ''the scaffolding construct is increasingly being used synonymously with support." Ainsi, d'après ces auteurs, bien que de nouveaux outils informatiques décrits comme étayages aient fourni de nouvelles techniques pour soutenir l'apprentissage des élèves, les caractéristiques importantes de l'étayage, telles que le diagnostic permanent, l'aide calibrée et le désétayage ont été négligés. Ils suggèrent que si les outils sont conçus sur la base de plusieurs niveaux de compréhension des élèves dans une situation donnée, les outils eux-mêmes pourraient être enlevés pour atteindre le désétayage.

Dans la littérature sur l'apprentissage par investigation avec des EIAH, le terme guidage (guidance en anglais) est rencontré dans les travaux de Kirschner et al. (2006) et plus récemment il a été utilisé par Zacharia et al. (2015) et Gerard et al. (2015) alors que le terme *scaffold* était employé initialement par cette équipe de recherche (Linn & Eylon, 2011). Le terme d'étayage ne semblant pas toujours être utilisé à bon escient, dans la suite de la présentation des travaux de la littérature, même si les auteurs utilisent le terme étayage ou « scaffold », le terme étayage est remplacé par guidage quand il n'existe pas de diagnostic de l'activité d'un élève, associé à un désétayage possible.

Un numéro spécial de « The Journal of the Learning Sciences » publié en 2004 est consacré aux guidages dans des systèmes d'enseignement complexes (comme l'apprentissage par investigation ou démarches expérimentales) utilisant des environnements informatiques. Selon les auteurs, différentes catégories de guidage sont proposées. Par exemple, Quintana et al. (2004) proposent trois grandes catégories en lien avec l'apprentissage par investigation scientifique, à savoir *sense-making, process management, articulation and reflection*. Ces catégories correspondent à trois objectifs qui peuvent être traduits par (i) donner du sens, (ii) la gestion du processus (de la démarche menée) et (iii) l'articulation et la réflexion. Les auteurs proposent des stratégies de guidage à l'intérieur de ces trois grandes catégories. Ces stratégies spécifient par quels moyens un objectif peut être atteint. Un exemple est donné pour chaque catégorie ; (i) donner du sens : rendre des stratégies disciplinaires explicites dans les interactions de l'apprenant avec l'outil, (ii) la gestion du processus : décrire une tâche complexe en la décomposant en sous-taches et (iii) l'articulation et la réflexion : fournir des guidages (qui peuvent être de simples rappels) pour articuler des idées dans le but de donner du sens, comme documenter des résultats importants de leur investigation. Il semble possible de relier ces stratégies de guidage à des intentions d'étayage et des moyens possibles pour atteindre ces objectifs, tel que proposé par van de Pol et al. (2010).

Dans la même revue, Reiser (2004) propose deux mécanismes de guidage fournis par des outils informatiques, qui sont complémentaires : (i) structurer la tâche de résolution de problèmes, en utilisant l'outil pour apporter une structure additionnelle ou des contraintes, dans le but de réduire la complexité et les choix, et ainsi de rendre la résolution du problème plus aisée lorsque le processus est trop complexe ou quand les élèves n'ont pas les compétences nécessaires pour mener à bien le processus par eux-mêmes ; (ii) problématiser des aspects du sujet étudié, dans le but d'augmenter l'utilité de la résolution de problème pour l'apprentissage. La problématisation peut être effectuée en attirant l'attention sur un élément du problème, pour faire raisonner les élèves, expliciter une décision. A l'inverse du premier mécanisme de guidage, la problématisation ne simplifie pas la tâche mais pourrait engendrer des difficultés sur le court terme, dans le but d'améliorer l'apprentissage. Il est difficile de considérer la problématisation comme un étayage, car l'idée de diagnostic et le désétayage ne sont pas présents, même

si d'après Reiser (2004), la problématisation prend racine dans deux fonctions d'étayage proposées par Wood et al. (1976), *la signalisation de caractéristiques prédominantes* et le *maintien de l'orientation*.

Azevedo et al. (2004) proposent une classification qui distingue les guidages fixes et adaptatifs. Les premiers sont statiques, identiques pour tous les apprenants, alors que les deuxièmes permettent de répondre à un besoin individuel. Les guidages adaptatifs peuvent correspondre à un étayage s'ils sont accompagnés d'un désétayage personnalisé.

Une classification de guidages a été proposée par de Jong et Lazonder (2014), reprise par Zacharia et al. (2015) pour préciser certaines catégories. Six catégories de guidage sont proposées par Zacharia et al. (2015) : (i) *process constraints* (contraintes du processus), pour restreindre l'activité de l'élève, le nombre d'option qu'il doit considérer pendant le processus, comme par exemple organiser l'ensemble de la démarche à suivre ; (ii) *performance dashboard* (un tableau de bord de performance), qui permet à l'élève d'avoir une visibilité sur la progression de sa tâche ou sur son processus d'apprentissage ; (iii) *prompts* (messages), dans le but de rappeler aux élèves certaines actions à faire, qui peuvent être des consignes ; (iv) *heuristics* (heuristique, explication) qui rappelle la tâche à effectuer et fournit des instructions sur la façon de réaliser cette tâche, ce que le *prompt* ne fait pas ; (v) des *scaffolds* (étayages), ce sont des outils qui expliquent ou prennent en charge la partie la plus difficile d'une action, par exemple en structurant ou simplifiant le processus et les activités de l'élève ; (vi) *direct presentation of information* (présentation directe d'informations) est un guidage utile quand l'élève manque de connaissances préalables ou ne trouve pas l'information nécessaire pour accomplir une tâche par lui-même. Il nous semble que ces catégories ne sont pas uniformes car elles mélangent des objectifs de guidage (*contraintes du processus* qui s'apparente à la *réduction du degré de liberté* de Wood et al. (1976) ; et *présentation directe d'informations* comparable avec *démonstration ou présentation de modèles* proposé par Wood et al. (1976)) avec des moyens de guidage, qui sont des propositions techniques d'atteindre un objectif (*tableau de bord de performance, message, heuristique* et *étayage*). La catégorie *étayage* de Zacharia et al. (2015) est assez déroutante car cette catégorie n'implique pas le processus complet qui devrait démarrer avec le diagnostic et conduire à un désétayage. La description de cette catégorie est proche de *process constraints* mais ce serait un moyen précis de guidage proposé par un outil (un exemple donné dans l'article est un outil qui permet d'aider à formuler des hypothèses).

Un article récent de Kim et al. (2019) mérite une attention particulière car ils proposent un système d'étayages variés, lors de situations d'apprentissages par problème, qui sont également des problèmes complexes, s'inscrivant dans les domaines mal définis. Leur modèle va au-delà des autres travaux présentés, car ils incluent les sources d'étayage, mettant en jeu trois acteurs, l'apprenant, l'environnement informatique et l'enseignant. Les étayages peuvent être classés en quatre catégories : *conceptuel, métacognitif, stratégique et motivationnel*. Ces auteurs définissent ces catégories en termes d'objectifs de guidage, mise à part pour l'étayage *conceptuel* où des moyens sont proposés (des messages ou des indications). Ces auteurs suggèrent des sources multiples d'étayages, fournis par un enseignant et un environnement informatique. Cependant ils précisent que dans beaucoup de situations d'étayage proposées dans la littérature, une difficulté vient du désétayage associé à l'étayage d'un environnement informatique. Ils soulignent deux cas non satisfaisants. Dans le premier, le désétayage est fixe car il est enlevé après un intervalle de temps prédéterminé, et ainsi n'est pas totalement adapté aux aptitudes de chaque élève. Dans le deuxième, le désétayage est effectué par un système de tuteurs intelligents, basé sur le diagnostic de la performance des élèves, mais des études critiquent ce désétayage en raison d'un fort risque de diagnostic erroné. Kim et al. (2019) proposent plusieurs alternatives comme stratégie d'étayage. L'une d'elles est le désétayage décidé par l'élève, qui contrôle alors son propre apprentissage, en supprimant des étayages proposés par l'ordinateur, qu'il juge inutiles. Une limitation est la capacité des élèves, qui peut être insuffisante à juger si l'étayage est encore nécessaire dans leur processus d'apprentissage. Pour dépasser cette limitation, une proposition est de faire intervenir

l'enseignant et l'ordinateur pour encadrer ce processus. Si par un mécanisme de diagnostic automatique de l'état d'apprentissage et des progrès de l'élève, la décision de l'élève à propos du désétayage est jugée inappropriée par l'ordinateur, ce dernier apportera un soutien à l'élève dans son jugement en posant des questions de réflexions, telles que « Êtes-vous certain que vous n'avez plus besoin d'aide ? ». A l'inverse, si l'élève continue à profiter de l'étayage pour terminer une tâche au plus vite, en ignorant les messages de l'ordinateur, l'enseignant peut jouer un contrôle après un temps prédéfini d'étayage pour voir si l'élève bénéficie toujours d'un étayage et le questionner le cas échéant. Si cette proposition d'étayage ne peut satisfaire les besoins des étudiants, ces auteurs proposent une autre piste d'étayage. Il s'agit d'un ajout complémentaire d'étayage, plus spécifique, immédiatement apporté par l'ordinateur, si l'élève sollicite cette aide (grâce à un bouton intégré dans l'interface). De plus, si l'élève n'est pas satisfait par cette aide, il peut solliciter l'enseignant pour une autre aide, via l'interface informatique. L'enseignant peut alors diagnostiquer l'état d'apprentissage de l'élève et apporter l'étayage complémentaire adapté. L'intérêt est que l'enseignant peut focaliser son attention sur les étudiants qui demandent plus d'aide, ce qui devient gérable dans une situation de classe avec beaucoup d'élèves. Ces mécanismes d'étayage et de désétayage peuvent se combiner comme le résume la Figure 14.

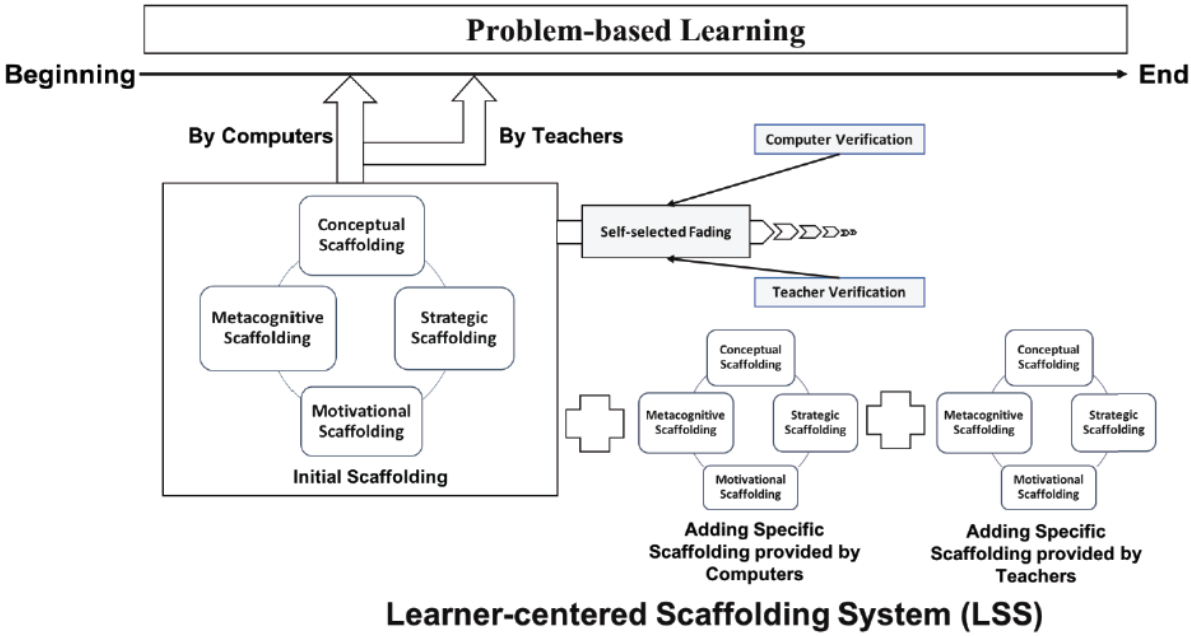


Figure 14. Modèle conceptuel de l'étayage, centré sur l'apprenant, proposé par Kim et al. (2019) dans le cadre d'un apprentissage par problème.

Voici une synthèse de la réflexion sur les guidages et étayages, suite à la revue de la littérature proposée depuis le début de ce chapitre.

- Un étayage implique un élément de diagnostic de l'activité d'un élève, associé à un désétayage possible.
- Le terme étayage n'est donc pas adapté à une aide fixe qui n'implique pas de diagnostic spécifique d'un élève, alors que le terme **guidage** est plus général. Le guidage englobe à la fois les aides de types fixe et adaptatif (c.a.d. les étayages mais aussi les aides adaptatives sans désétayage).
- La proposition de van de Pol et al. (2010), distinguant les intentions de guidage et les moyens de guidage est intéressante. Si cette classification a été proposée pour des étayages, la plupart des catégories peuvent aussi s'appliquer aux guidages fixes. Cette classification pourrait servir de base et être enrichie avec des moyens de guidage spécifiques aux EIAH, tels que certains proposés par Zacharia et al. (2015). Des propositions de classification seront présentées dans la partie *Prospectives*.
- Le modèle de Kim et al. (2019) est intéressant pour considérer des multiples acteurs et types d'étayages.

Après avoir présenté des catégories de guidages, cette synthèse bibliographique se poursuit par des résultats montrant l'efficacité de guidages.

5.1.4. Revue de la littérature sur l'efficacité des guidages par des EIAH pour des apprenants impliqués dans des activités de démarche expérimentale

Comme dit précédemment, selon Aditomo et Klieme (2020), l'enseignement par investigation peut être associé à un apprentissage efficace lorsqu'il est associé à un guidage par les enseignants. Néanmoins des études ont montré que la réussite d'un enseignement par investigation est liée à la performance des enseignants dans la mise en place de méthodes d'enseignement, à la qualité du guidage par les enseignants ou à la qualité du guidage par un EIAH (Blanchard et al., 2010 ; Gerard et al., 2016).

De nombreux articles s'intéressent aux guidages apportés par un environnement informatique lors d'une situation d'apprentissage par investigation, dans un but d'améliorer la compréhension de phénomènes par les élèves. Quelques conclusions issues de ces travaux de la littérature sont présentées ci-après.

Azevedo et al. (2004) distinguent les guidages fixes et adaptatifs. Dans la situation qu'ils ont étudiée, les résultats montrent que les élèves ont une meilleure compréhension des concepts étudiés lorsqu'ils ont un guidage adaptatif par rapport à un guidage fixe.

A partir de la classification qu'ils ont proposée, Zacharia et al. (2015) ont fait une synthèse de la littérature des différentes formes de guidage pour aider les élèves qui utilisent des laboratoires en ligne, qu'ils soient virtuels ou distants, dans le cadre d'une démarche expérimentale en science. Ils ont organisé cette synthèse selon les six catégories de guidage qu'ils proposent et les cinq phases du cycle d'investigation proposées par Pedaste et al. (2015) : orientation, conceptualisation, investigation, conclusion et discussion. A partir de là, ils ont montré quels types de guidage se sont avérés efficaces pour quelle phase du cycle d'investigation et pourraient ainsi être utilisés dans de futurs développement d'EIAH (Pedaste et al., 2015).

Une synthèse de travaux sur les guidages dans le cadre d'apprentissages basés sur l'investigation indique que les élèves recevant un guidage obtiennent un meilleur score aux tests d'apprentissage réalisés après enseignement, que les élèves qui n'ont pas eu de guidage (Lazonder & Harmsen, 2016). Si on regarde plus finement divers guidages, Gerard et al. (2015) proposent une synthèse de la littérature sur les *automated adaptive guidance* (guidage automatique adaptatif), ce qui correspond à un système de tuteurs intelligents (VanLehn, 2011). Ils ont séparé les études en deux catégories : celles qui font une comparaison entre une situation d'enseignement qui fait appel à un guidage automatique adaptatif et une autre condition d'enseignement plus traditionnelle comme contrôle (aucun guidage, guidage par l'enseignant, guidage fixe par un EIAH…) ; la deuxième catégorie correspond à une comparaison entre

une situation de guidage automatique adaptatif simple (contrôle) et une situation de guidage automatique adaptatif amélioré (par exemple, un guidage qui encourage l'élève à faire plusieurs tentatives, par comparaison à une réponse qui se contente de dire si la tâche est correcte ou incorrecte). Les résultats montrent que dans les deux catégories d'étude, le guidage apporté dans la situation expérimentale étudiée apporte une plus-value par rapport à la condition de guidage contrôle, pour la plupart des élèves, et en particulier pour ceux qui ont des connaissances préalables faibles. Les apprentissages sont plus importants lorsque les élèves sont guidés dans leur démarche d'investigation par des activités pédagogiques favorisant une tâche conceptuelle, telle que demander aux élèves de reconsidérer leurs idées ou réfléchir sur leur compréhension des phénomènes et sur le processus utilisé pour parvenir à leur réponse, par rapport à un guidage adaptatif qui vérifie uniquement si une réponse est correcte et/ou oriente les élèves vers la bonne réponse.

L'étude de Ryoo et Linn (2016) va dans le même sens car les élèves ayant un guidage réflexif comprennent mieux les concepts scientifiques (les flux d'énergie en sciences de la vie) que ceux qui ont été confrontés à un guidage directif. Le guidage directif (*directive guidance*) donne des informations aux élèves sur ce qu'il faut faire (exemple de message tiré de la publication « Belle tentative ! Maintenant modifie ton diagramme pour montrer que l'excédent de glucose est emmagasiné dans la plante ») ; le guidage réflexif (*reflective guidance*) permet d'aider les élèves à faire des choix parmi plusieurs idées pour répondre à un problème (un exemple donné est « Belle tentative ! Maintenant reprend la visualisation de l'étape X pour découvrir ce que les plantes font avec l'excédent de glucose et modifie ton diagramme »). L'analyse détaillée des résultats suggère que lors du guidage réflexif, les élèves retournent voir des documents pertinents pour trouver des informations utiles, ce qui les pousse à reconsidérer activement leurs réponses et ainsi identifier les lacunes dans leur compréhension. Cela expliquerait l'effet positif sur les apprentissages.

Lou et al. (2020) ont développé un EIAH pour guider des étudiants dans un apprentissage de chimie. Le système de guidage implique plusieurs composantes, à savoir l'activation des connaissances préalables, l'autoréflexion, des exemples résolus et des rétroactions. Ils ont comparé cette situation expérimentale de guidage à deux situations contrôles, l'une consiste en un enseignement traditionnel effectué par une vidéo de cours, l'autre correspond à l'utilisation d'un enseignement en ligne (Khan Academy) qui permet à l'étudiant d'avancer à son rythme et fournit des rétroactions à la fin du travail. Les résultats montrent que l'apprentissage disciplinaire est plus important pour le groupe expérimental par rapport aux deux groupes contrôles, et qu'il n'existe pas de différence significative entre les groupes contrôles. De plus, les conditions de guidage de la situation expérimentale permettent aux étudiants avec un faible niveau de connaissance préalable de rattraper au post-test le niveau des étudiants ayant un niveau élevé de connaissance préalable (ce qui n'est pas le cas pour les groupes contrôles). Il semble que le premier groupe d'étudiant a su tirer bénéfice de l'activation des connaissances préalables.

5.1.5. Focus sur des guidages de la conception expérimentale

La conception expérimentale dans le laboratoire de science est une tâche complexe, même pour les scientifiques. En effet, Baker et Dunbar (1996) ont étudié le travail de scientifiques dans des laboratoires de recherche et ont trouvé que l'activité de concevoir une expérience dans un laboratoire scientifique implique pour le scientifique des étapes cognitives complexes avec des contraintes multiples. Les scientifiques doivent naviguer parmi de nombreux obstacles pour obtenir un résultat (Dunbar, 1999). Cette complexité met en évidence le besoin de guidage lorsqu'un un élève conçoit une expérience, guidage qui peut être fourni par un enseignant (Etkina et al., 2010) ou par des environnements informatiques.

La diversité des études sur les guidages par des EIAH est moindre pour l'activité de conception expérimentale que pour les démarches expérimentales. Dans une version papier-crayon, Puntambekar

et Kolodner (2005) ont trouvé que les élèves ont besoin de plusieurs formes de support de guidage pour apprendre des sciences avec succès lors d'activités de conception, ces formes incluant des guidages fixes et adaptatifs (hors EIAH) : structuration de la tâche, des consignes plus précises relatives à l'utilisation des ressources et au travail à réaliser dans chaque étape de la conception, mais aussi des consignes pour les aider à raisonner et évaluer leur travail. En plus de ces guidages fixes, les auteurs indiquent le besoin d'une interaction avec l'enseignant pour réguler l'activité. Cela se rapproche de situations de guidage adaptatif dans un EIAH.

Dans le cadre des EIAH, une idée de guidage de la conception expérimentale est proposée par Morgan et Brooks (2012) ; il s'agit d'un guidage fixe de structuration avec une conception à rebours dans laquelle les élèves commencent par spécifier les données qui permettent de répondre à leur question, puis ils décident des mesures nécessaires et à la fin ils précisent la liste de matériel. L'utilisation de ce type de guidage a entraîné des performances significativement plus élevées pour les rapports de laboratoire produits par les élèves. En revanche leur étude n'a pas testé l'impact des guidages sur les apprentissages.

Dans l'étude de McElhaney et Linn (2011), les élèves étudient les facteurs favorisant les blessures d'un conducteur lorsqu'un airbag est présent dans sa voiture, grâce à l'utilisation d'une simulation. Si l'environnement utilisé (WISE) apporte un guidage sur l'ensemble de la démarche expérimentale, la phase de conception de l'expérience joue un rôle important. L'activité est structurée car ces élèves doivent choisir une question à investiguer parmi une liste de questions proposées (de façon alternative, ils peuvent juste choisir d'explorer la simulation), puis spécifier les valeurs de paramètres du modèle d'airbag, avant de lancer la simulation « de crash ». En plus de ce guidage fixe, la simulation donne un résultat du test qui permet à l'élève d'avoir un retour sur ses choix de valeurs de paramètre. Les auteurs montrent que les élèves ont besoin d'un guidage qui les prépare à agir intentionnellement et à vérifier leur compréhension en utilisant leur connaissance de la situation plutôt que d'appliquer des protocoles sans donner de sens aux résultats. Cela rejoint l'étude de Séré et Beney (1997) qui montre que les étudiants ont des difficultés à faire correspondre des actions aux savoirs conceptuels en jeu.

Dans une autre étude, un guidage aide les élèves à définir les paramètres d'une simulation : il s'agit de l'outil "Experiment Design Tool" (van Riesen et al., 2018) dans lequel les élèves ne choisissent pas uniquement les valeurs de paramètres, mais également les paramètres eux-mêmes. Pour chaque paramètre prédéfini de la simulation, les élèves indiquent s'ils veulent le faire varier (variable indépendante, une valeur par test), le garder constant (variable de contrôle, une valeur unique pour l'ensemble des tests) ou le mesurer (variable dépendante). Dans un groupe expérimental, des élèves bénéficient d'un guidage supplémentaire, qui sont des questions de réflexions par rapport à leur conception. Ces questions concernent la démarche d'expérimentation, telle que modifier une variable à la fois, mais pas les concepts de physique. Dans les situations étudiées par ces auteurs, la conception concerne des expériences effectuées par des simulations, qui donnent une vue très simplifiée du processus expérimental car l'expérience est seulement configurée par un jeu de paramètres définis. Les résultats de leur étude montrent que les élèves ont besoin d'un minimum de connaissances préalables sur les concepts de physique en jeu, afin de bénéficier pleinement du guidage supplémentaire.

Une étude proche effectuée par Xenofontos et al. (2018) utilisent le même outil "Experiment Design Tool" pour un enseignement sur les circuits électriques et testent deux conditions d'utilisation de cet outil qui diffèrent dans le degré de guidage apporté aux élèves. Dans la condition 1, le choix des variables et leur classification (dépendante, indépendant et contrôle) sont imposés, l'élève doit alors choisir le nombre d'expériences et la valeur attribuée aux variables. Dans la condition 2, tout est à la charge des élèves qui doivent commencer par sélectionner les variables mises en jeu dans une liste et les classer. Les résultats montrent que dans les deux conditions, les élèves améliorent leurs connaissances conceptuelles, alors que seule la condition 2, moins guidée, favorise l'acquisition de compétences

d'investigation, telles qu'identifier des variables, formuler des hypothèses ou concevoir une investigation.

Après avoir présenté une synthèse des travaux du domaine, nous poursuivons avec la présentation de notre travail autour du guidage des démarches expérimentales avec un EIAH : la pratique d'une démarche expérimentale avec des guidages fixes uniquement (partie 5.2) et la conception d'expériences avec des guidages fixes (partie 5.3) ou avec des guidages adaptatifs (partie 5.4).

5.2. Guidages fixes dans nos travaux sur la démarche expérimentale

Nous avons développé deux environnements informatiques (SCY-Lab et LabNbook) qui permettent de faire travailler des étudiants sur l'ensemble de la démarche expérimentale. Par rapport à la synthèse de Zacharia et al. (2015), ces deux EIAH ne sont pas spécifiques d'une des phases de la démarche et incluent uniquement des guidages fixes. Par conséquent, ces EIAH ne relèvent pas d'un STI. En effet, il est très difficile d'envisager un diagnostic dans un EIAH très ouvert tel que LabNbook qui n'inclut pas de contenu.

5.2.1. SCY-Lab

La plateforme issue du projet européen SCY permet à des élèves de travailler sur des missions qui ont été conçues selon un scénario pédagogique prédéfini. Quel que soit le scénario, l'activité est organisée en différents espaces appelés LAS qui structurent le travail que les élèves devront faire. Par exemple le scénario choisi pour la mission « Laboratoire de police scientifique » (voir la Figure 4), s'apparente à une démarche expérimentale. La carte de la mission donne une vision d'ensemble des LAS qui se rapprochent des types de tâches du cycle expérimental ; ce guidage est une structuration à haut niveau, de la démarche, correspondant au type de tâches principal. Au sein de chaque LAS, l'élève a également un aperçu de tous les objets qu'il/elle doit produire (nommés ELO), qui correspondent à des ingrédients de la technique pour répondre au type de tâches principal ; ce guidage correspond à une structuration de la tâche d'une étape de la démarche. De plus, attaché à chaque LAS et ELO, un « tiroir » qu'il est possible d'ouvrir et fermer, comprend des informations supplémentaires. Ces guidages sont pour les LAS des consignes et objectifs d'apprentissage, pour les ELO des consignes et des ressources qui correspondent à une présentation d'informations (liens internet, textes). Ces guidages sont davantage décrits par de Jong et al. (2012). La plateforme SCY-Lab n'étant plus développée, aucun guidage adaptatif ne sera intégré.

5.2.2. LabNbook

Nous avons choisi de développer au sein de l'équipe MeTAH, la plateforme LabNbook, qui reprend certaines des idées que nous avions apportées dans SCY-Lab.

- Par rapport à la structure de l'activité, les étudiants ont une vision complète de leur mission dans SCY-Lab par la carte de la mission, puis ils entrent dans chaque LAS. Dans LabNbook, les étudiants visualisent directement dans un espace unique la structure de l'ensemble de l'activité, de par les parties de rapport proposées par l'enseignant. Cela correspond donc à une contrainte du processus pour simplifier la démarche. Ces « parties de rapport », pourraient s'apparenter aux LAS mais aucune intention pédagogique n'est imposée à l'enseignant qui peut structurer l'activité comme il le souhaite.
- Dans chaque partie de rapport de LabNbook, l'enseignant a la possibilité de pré-remplir des labdocs et dans ce cas il apporte un guidage fixe en structurant la tâche d'une étape de la démarche. Néanmoins, ce guidage est optionnel car les étudiants peuvent créer leurs productions (labdoc) à partir des 4 outils (ou types de labdoc) disponibles et des consignes données.

- Les consignes sont disponibles à deux niveaux comme dans SCY-Lab. Il existe un espace pour des consignes générales et des consignes spécifiques peuvent être données par l'enseignant au niveau des parties de rapport.
- Par ailleurs, l'enseignant peut donner accès à des cours (document attachés, lien vers des sites internet) dans un espace unique de ressources.

Un exemple permet d'illustrer le guidage dans LabNbook. Lors de la thèse de Reinaldo Saavedra (2015), des élèves de première scientifique devaient résoudre le problème suivant : « Dans le cadre de la maladie *Xeroderma pigmentosum*, vous allez étudier la protéine XPa impliquée dans le processus de réparation. Comment expliquer que des mutations du gène Xpa aient des conséquences sur la taille et la fonctionnalité des différentes protéines synthétisées ? ». Les élèves devaient mettre en œuvre une démarche expérimentale pour résoudre ce problème et pouvaient visualiser les différentes étapes de cette démarche dans LabNbook (voir la Figure 15).

Tous les éléments de la situation (rapport, consignes, ressources) sont regroupés dans un seul espace de travail, ce qui permet de se déplacer aisément de l'un à l'autre. Alors que des « auteurs énoncent les avantages qu'offre la structuration de la démarche dans un EIAH (Quintana et al., 2004 ; Reiser, 2004), aucun d'eux ne met en valeur le bénéfice que l'on peut tirer de la visualisation de l'ensemble de la démarche et de l'accès plus souple aux ressources. (…) Dans le but de guider une démarche de conception menée par des élèves du collège, Puntambekar et Kolodner (2005), ont conçu un rapport expérimental en version papier-crayon. Comme dans LabNbook, ce rapport a été structuré en fonction des différentes étapes de la démarche expérimentale mais est composé de plusieurs pages, ce qui oblige les élèves à faire plusieurs allers retours entre les différentes pages de ce rapport. Ces auteurs constatent que les supports de guidage proposés permettent aux élèves de mener à bien chaque étape de la conception mais ils s'aperçoivent que les élèves ne parviennent pas à faire des liens pertinents entre les différentes étapes de la démarche » (Saavedra, 2015).

La consigne 1 (cf. la Figure 15), guide les élèves dans l'utilisation des documents disponibles dans les ressources en fonction des activités à réaliser dans les étapes de la démarche expérimentale. En effet, « le rôle des consignes en tant que supports de guidage a été mentionné dans des travaux précédents (Quintana et al., 2004 ; Reiser, 2004 ; Zacharia et al., 2015). Pour ces auteurs, des consignes ou des notifications vont permettre de guider les élèves lors d'un travail en cours » (Saavedra, 2015, p. 144). Notons que dans ce cas, la consigne ne correspond pas à une information nécessaire pour résoudre la tâche (telle une description de la tâche attendue), mais plutôt à une information optionnelle qui va guider l'élève.

A ce jour, LabNbook embarque uniquement des guidages fixes. La partie *Prospectives* développe les travaux que nous avons menés pour l'évaluation des stratégies de guidage utilisées par des enseignants avec LabNbook (voir partie 6.2). Un projet récent dans LabNbook a permis de concevoir et développer une interface de suivi de l'activité des étudiants à partir de leurs traces d'activité collectées. Si dans un premier temps, un tableau de bord est conçu à destination des enseignants, une évolution est de proposer aux étudiants un tableau de bord de performance correspondant à un guidage adaptatif (voir partie 6.3).

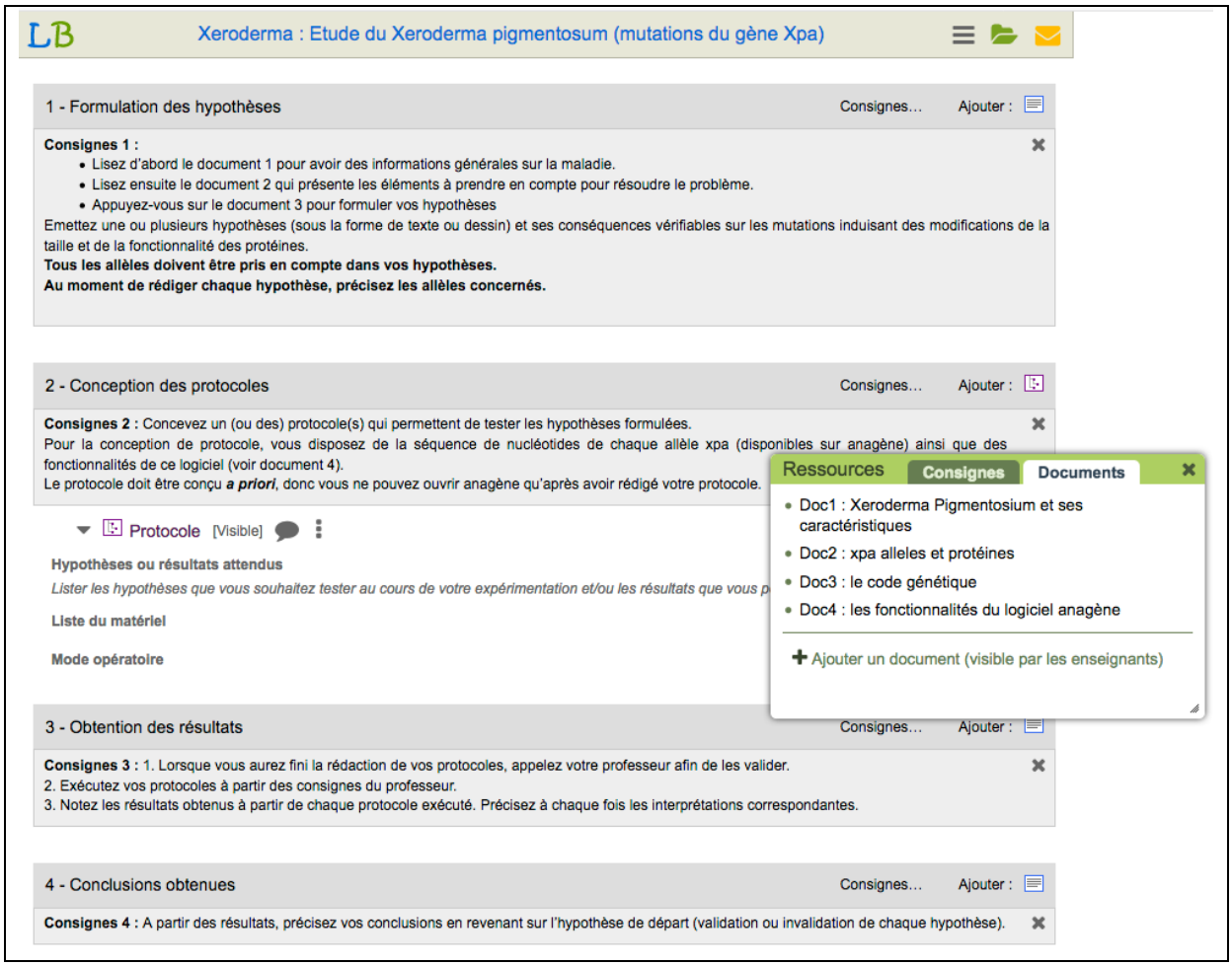


Figure 15. Copie d'écran de la mission Xeroderma, telle que les élèves la voient au début de leur travail.

5.3. Guidages fixes dans nos travaux sur la conception expérimentale

A l'inverse de la partie précédente, nous nous intéressons ici aux guidages de l'étape de la conception expérimentale, et non à ceux d'une démarche expérimentale dans son ensemble.

5.3.1. Copex-chimie

Ce travail a été publié dans Girault et d'Ham (2014). Le guidage fixe dans Copex-chimie correspond principalement à une structuration de l'activité de conception. Il existe aussi des consignes précisant ce qui est attendu et donnant quelques aides, ainsi que des parties de cours qui présentent de l'information.

A partir du modèle du protocole expérimental décrit précédemment, nous avons structuré l'activité de conception de l'expérience dans Copex-chimie à deux niveaux.

Au plus haut niveau, le protocole doit être rédigé en suivant les quatre étapes imposées : (1) sélection des produits, (2) préparation des solutions de la gamme étalon, (3) obtention des points de la courbe étalon, (4) obtention de la concentration en E124 du sirop de grenadine. Ces étapes correspondent à des types de tâches qui sont des ingrédients de la technique nécessaire pour mettre en œuvre la tâche principale.

A un plus bas niveau, l'élève doit choisir les actions qui constituent son protocole, à partir de huit actions accessibles via des icônes (par exemple, préparer une solution par dilution, mesurer une absorbance). Pour chaque action ajoutée dans le protocole, l'élève doit déterminer la valeur de paramètres associés à chaque action (deux à cinq paramètres). Par exemple, quand un élève choisit l'action « préparer une solution par dilution », il doit fixer les paramètres suivants : nom de la nouvelle solution, volume de la

solution mère, nature de la solution mère, solvant et volume total de la nouvelle solution (voir la Figure 3). Ces actions correspondent à des types de tâches que les élèves peuvent mobilier, pour décrire la technique de deuxième niveau (c'est-à-dire celle qui permet de résoudre chaque étape).

Dans Copex-chimie, à l'inverse des laboratoires basés sur des simulations (van Riesen et al., 2018), qui donnent une vue très simplifiée du processus expérimental, l'expérience n'est pas configurée par un jeu de paramètres définis, mais à travers l'écriture d'un protocole complet qui considère le matériel expérimental et ses contraintes. Cela entraîne les élèves à concevoir des expériences qui seront ensuite réalisées soit par une simulation, soit de façon réelle au laboratoire. Dans l'environnement Copex-chimie, le guidage par structuration de la tâche aide les élèves à écrire des protocoles complets (Girault et d'Ham, 2014). Les résultats ont montré que lorsque le protocole est pré-structuré, les élèves réussissent mieux dans la tâche demandée que lorsqu'ils ne disposent pas de ce guidage.

5.3.2. Copex (dans LabNbook)

Comme présenté dans le chapitre 3 (paragraphe 3.5), dans Copex, le guidage fixe correspond à une structuration de l'activité de conception expérimentale, qui se manifeste de différentes façons.

- La conception de l'expérience se matérialise par un protocole expérimental organisé en cinq rubriques qui sont modifiables par l'enseignant : questions de recherche, hypothèses et principe de la manipulation, liste du matériel, mode opératoire.
- La conception du protocole expérimental conduit à l'écriture d'un mode opératoire qui est structuré en étapes, sous étapes et actions libres.
- De façon alternative, les actions libres peuvent être remplacées par des actions structurées dans lesquelles les étudiants doivent spécifier des paramètres.
- Au niveau des étapes et des actions, il existe un espace « commentaire » qui permet d'ajouter du texte libre. Cela fait écho au fait que nous avions observé dans notre étude des pratiques de documents de TP (Girault et al., 2012), que le protocole est souvent mélangé à des informations de type technologique ou théorique. Nous avons choisi de les laisser dans le protocole, tout en leur donnant une place bien identifiée qui permet de savoir que ce n'est pas de la technique.

Nous avons eu l'occasion de tester l'utilisation de Copex à travers différentes études en classe, présentées ci-après.

5.3.2.1. Thèse de Reinaldo Saavedra

Pour faire suite à la partie sur les guidages de la démarche expérimentale dans LabNbook présentée précédemment, le travail des élèves dans l'activité de conception expérimentale est illustré ici. La mission Xeroderma a été testée dans deux classes de première scientifique avec LabNbook (classes A et B). Les élèves de la classe A ont eu des difficultés à saisir le travail demandé dans la rubrique « principe de la manipulation » de Copex : ils ne comprennent pas la différence entre les rubriques « principe de la manipulation » qui demande une stratégie et les moyens à mettre en œuvre et « mode opératoire » qui contient le détail qui permet de mettre en œuvre la manipulation, tels que les paramètres de l'expérience. « Certains groupes d'élèves détaillent les étapes et actions de leurs protocoles dans le principe de la manipulation, alors que c'est dans la section « mode opératoire » qu'ils devraient le faire » (Saavedra, 2015, p. 102) de façon structurée, grâce aux étapes et actions. Ainsi, le « principe de l'expérience », a conduit les élèves à élaborer des protocoles très vagues avec une absence d'étapes et/ou d'actions. « Afin d'éviter cette confusion, nous avons décidé d'enlever la rubrique « principe de la manipulation » pour la classe B » (Saavedra, p. 102). Une étude a montré que « les protocoles de la classe B sont globalement mieux rédigés que ceux de la classe A. Un nombre important d'élèves de la classe B parvient à concevoir des protocoles organisés sous la forme d'étapes et d'actions » (Saavedra,

1995, p.142). Ils ont ainsi mieux structuré leurs protocoles. Cet exemple illustre un guidage fixe de structuration d'une tâche.

5.3.2.2. Projet avec un enseignant de lycée

Dans le cadre d'un financement avec l'institut français de l'éducation (ifé), un enseignant du lycée Europole (Eric Martinet) a utilisé LabNbook avec des élèves de terminale scientifique. La mission que les élèves devaient effectuer dans LabNbook correspond à la construction d'une balance inertielle. L'enseignant a choisi de faire travailler ses élèves, selon un scénario pédagogique original. A partir d'une liste d'étapes ordonnées par ordre alphabétique, les élèves doivent proposer une organisation en étapes et éventuellement sous-étapes, qui rende compte du protocole qu'ils devront mettre en œuvre. Il s'agit d'un premier niveau de description de la technique (et éventuellement aussi un deuxième niveau s'il y a des sous-étapes).

Mode opératoire

- **Assembler l'appareil** (balance inertielle)
- **Construire un modèle graphique ou algébrique de la droite d'étalonnage** (on prendra en compte les incertitudes des couples de mesure étalon)
- **Déterminer la masse de la figurine à partir de de la courbe d'étalonnage et de la mesure de la période d'oscillation** (on évaluera les incertitude U(m) résultant de la mesure de T et de la fonction d'étalonnage)
- **Etalonner l'appareil** (balance inertielle)
- **Mesurer la période des oscillations du système masse-ressort pour la figurine**
- **Mesurer la période des oscillations du système masse-ressort pour chacune des masses étalon**
- **Rédiger la fiche technique de l'appareil** (contenant le certificat d'étalonnage)
- **Rédiger la notice utilisateur de l'appareil** (expliquant la procédure d'utilisation de la balance sur l'exemple de la mesure de la masse de la figurine et résumant ses qualités métrologiques)
- **Représenter graphiquement les nuages de points des couples {X= ....,Y=....} de mesures étalon** Préciser le choix des abscisses X et Y parmi les possibilités suivantes : T, racine(T), carré(T), m, racine(m), carré (m) - (on prendra en compte les incertitudes des couples de mesures étalon)
- **Utiliser l'appareil** (balance inertielle)
- **Valider la mesure de la masse de la figurine**

Figure 16. Copie d'écran du mode opératoire de la mission sur la balance inertielle, tel que les élèves le découvrent au début de la mission.

La Figure 16 permet de visualiser le mode opératoire tel qu'il est donné par l'enseignant dans Copex. Les étapes peuvent être facilement déplacées par glisser-déposer. La Figure 17 montre une correction avec l'organisation des étapes, telle que l'enseignant l'a prévue. Pour arriver à ce résultat, les élèves doivent compléter le protocole avec des actions dont le titre et la structure sont déjà proposés par l'enseignant. Il y a neuf actions proposées et une action libre (voir la Figure 18). Les élèves doivent sélectionner les actions qui leur semblent pertinentes mais très peu de contenu est à leur charge. Pour l'ensemble des neuf actions, un seul paramètre est défini par les étudiants (cf. le nombre d'oscillations dans la Figure 18). En revanche, l'enseignant demande à l'élève de justifier des étapes et actions, à partir d'informations données dans la partie commentaire « Choisir et compléter : cette action relève de la FIDELITE / JUSTESSE parce que… ».

L'enseignant demande également aux élèves de détailler les actions de deux parties du protocole. La Figure 17 montre un protocole attendu par l'enseignant qui inclut les actions de la sous-étape « Mesurer la période des oscillations du système masse-ressort pour chacune des masses étalon ». Les actions correspondent ici à un troisième niveau de description de la technique de résolution de la tâche principale.

Les élèves ont beaucoup apprécié ce travail d'organiser des étapes, puis de sélectionner et justifier des actions. Cette utilisation de Copex illustre le potentiel pédagogique de la structuration d'une tâche, aidée par des consignes qui demandent une justification de certaines actions.

Mode opératoire

- **Assembler l'appareil** (balance inertielle)
- **Etalonner l'appareil** (balance inertielle)
  - **Mesurer la période des oscillations du système masse-ressort pour chacune des masses étalon**
    - *Contrôler les conditions initiales des oscillations* - 1-conditions de Hooke. 2-pas d'effet pendulaire. 3-repérage et décompte des oscillations. Cette action relève de la JUSTESSE sinon l'utilisation du modèle n'est pas valide sinon
    - *Mesurer la durée de N oscillations* - Avec N= **20** oscillations. L'incertitude sur l'évaluation d'une période T doit être inférieure à 10%. Cette action relève de la FIDELITE parce qu'on limite l'influence de la variabilité statistique
    - *Réaliser deux mesures de N.T* - et reporter les valeurs dans le tableau. Cette action relève de la FIDELITE parce qu'on évalue la variabilité du résultat de mesure
    - *Contrôler le calcul automatique de T* - et de U(T). Contrôler que U(T)/T est inférieur à 10% (sinon refaire la mesure avec N plus grand). U(T) rend compte de la FIDELITE
    - *Contrôlez le calcul automatique de Y* - et de U(Y). L'expression de U(Y=T2) est donnée dans Doc.4 - Mesures et incertitudes (ressources). U(Y) rend compte de la FIDELITE
  - **Représenter graphiquement les nuages de points des couples {X=m.,Y=T2} de mesures étalon** Préciser le choix des abscisses X et Y parmi les possibilités suivantes : T, racine(T), carré(T), m, racine(m), carré (m) - (on prendra en compte les incertitudes des couples de mesures étalon)
  - **Construire un modèle graphique ou algébrique de la droite d'étalonnage** (on prendra en compte les incertitudes des couples de mesure étalon)
  - **Rédiger la fiche technique de l'appareil** (contenant le certificat d'étalonnage)
- **Utiliser l'appareil** (balance inertielle)
  - **Mesurer la période des oscillations du système masse-ressort pour la figurine**
  - **Déterminer la masse de la figurine à partir de de la courbe d'étalonnage et de la mesure de la période d'oscillation** (on évaluera les incertitude U(m) résultant de la mesure de T et de la fonction d'étalonnage)
  - **Valider la mesure de la masse de la figurine**
  - **Rédiger la notice utilisateur de l'appareil** (expliquant la procédure d'utilisation de la balance sur l'exemple de la mesure de la masse de la figurine et résumant ses qualités métrologiques)

Figure 17. Copie d'écran du mode opératoire attendu pour la mission sur la balance inertielle, après avoir complété les actions pour une sous-étape.

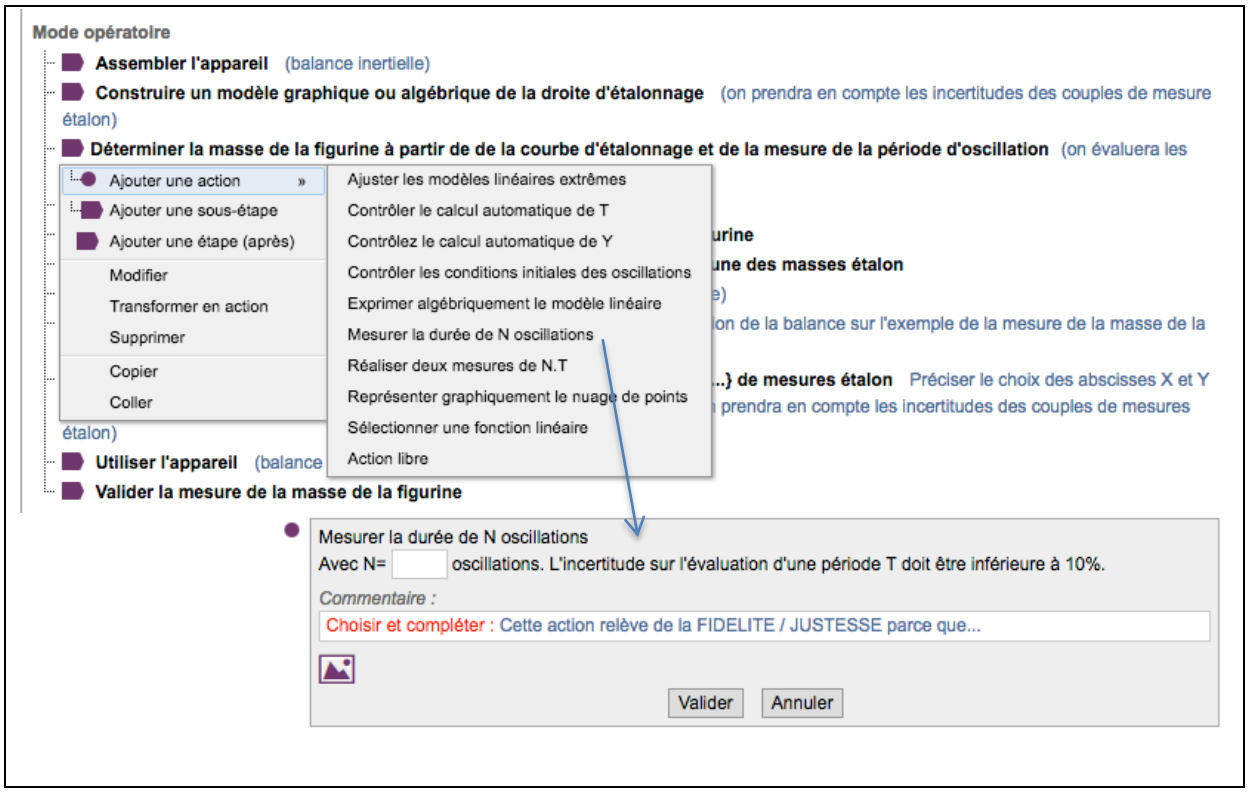


Figure 18. Copie d'écran du mode opératoire de la mission sur la balance inertielle, montrant la liste des actions disponibles et le détail d'une des actions.

5.3.2.3. Thèse de Catherine Bonnat

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons étudié les conditions de mise en place d'un diagnostic automatique des erreurs des élèves, dans le but de proposer ultérieurement des aides personnalisées visant l'apprentissage. Cela a été effectué avec une situation d'apprentissage en terminale scientifique (TS) de spécialité SVT, la tâche proposée aux élèves consistant à utiliser une démarche expérimentale afin de mettre en évidence le métabolisme de la fermentation alcoolique chez les levures. Dans ce cadre, les élèves doivent concevoir une expérience avec le logiciel Copex de LabNbook. Divers guidages fixes sont proposés : des consignes, des documents ressources et une structuration de l'activité. L'élaboration de l'ensemble de ces guidages nécessite un travail didactique préalable, dont la modélisation des connaissances en jeu dans l'activité, effectuée avec le modèle T4TEL (Chaachoua, 2019), qui permet de structurer l'activité. Une deuxième étape est la transposition de la modélisation didactique des connaissances dans LabNbook.

Une partie du travail de thèse a été publié dans Bonnat et al. (2018) et résumé ci-après. Nous avons voulu répondre à la question de recherche suivante : l'utilisation du modèle praxéologique nous aide-t-elle à élaborer une situation de conception expérimentale étayée ? Et plus précisément, nous nous sommes intéressés aux sous-questions suivantes : (a) « Cette modélisation didactique est-elle transposable dans l'environnement informatique étudié ? (b) Les guidages proposés prennent-ils en compte les difficultés des élèves de nature conceptuelle, mais aussi les difficultés liées à la rédaction d'un protocole ? » (Bonnat et al., 2018, p.39).

Modélisation didactique de l'activité de l'élève

La méthodologie utilisée se découpe en deux temps (Figure 19) : (1) la modélisation didactique de la tâche par l'élaboration d'une praxéologie de référence (non montrée dans cette note de synthèse) et (2) la modélisation d'une situation d'apprentissage qui précise les éléments praxéologiques attendus par l'institution scolaire dans laquelle nous nous plaçons. Pour cela, à partir de la praxéologie de référence qui prend en compte l'ensemble des institutions, nous décrivons la praxéologie à enseigner en se plaçant dans le cadre d'une classe de lycée. Cette phase consiste à extraire les types de tâches de la praxéologie de référence qui pourraient être à la charge d'un élève de TS spécialité SVT.

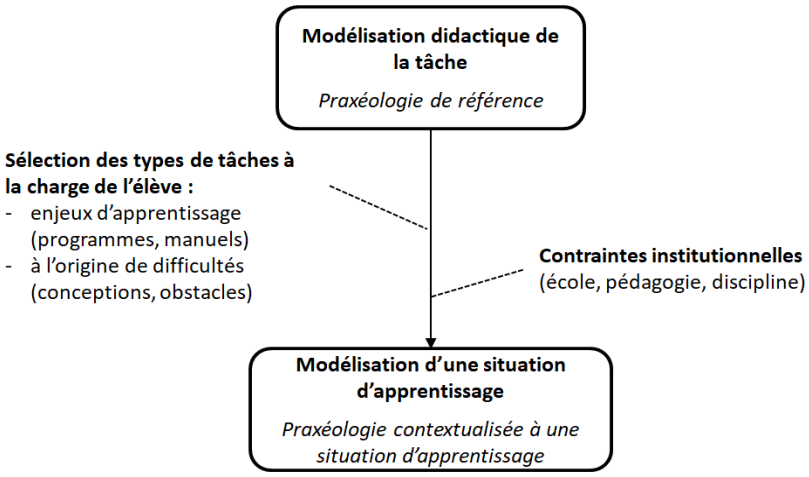


Figure 19. Méthodologie de modélisation didactique d'une situation d'apprentissage (Bonnat et al., 2019, p. 40).

« Ce processus se réalise en deux temps.

- Identifier les types de tâches qui sont enjeux d'apprentissage dans la classe ciblée, et qui pourraient être à l'origine de difficultés.

- Prendre en compte les contraintes institutionnelles qui se situent au niveau de l'école, de la pédagogie ou de la discipline.

L'élaboration de la praxéologie institutionnelle nous a notamment permis d'identifier les enjeux d'apprentissages (…) étape nécessaire à la sélection des types de tâches, techniques et technologies à la charge de l'élève dans le contexte d'une classe de TS. Nous écartons les éléments que l'institution ne considère pas nécessaire d'expliquer (techniques des types de tâches élémentaires). Enfin, nous distinguons les types de tâches qui se réfèrent à des technologies dont les concepts font appel à des connaissances acquises dans les classes antérieures. Cette distinction est nécessaire dans l'élaboration des guidages conceptuels.

De plus, pour pouvoir aider les élèves et proposer des guidages fixes ciblés, nous avons réalisé en amont une analyse des conceptions et obstacles sur le thème de la fermentation alcoolique (Bonnat et al., 2019). Nous avons donc identifié, pour chaque élément praxéologique sélectionné, les possibles difficultés conceptuelles des élèves » (Bonnat et al., 2018, p.41).

« Enfin, nous avons également pris en compte, dans le choix des types de tâches et de leurs valeurs de paramètres que nous mettons à la charge de l'élève, certaines contraintes institutionnelles liées à l'école, aux mises en œuvre pédagogiques et à la discipline. En effet, au niveau de l'école certaines règles en termes de choix de matériels s'appliquent. Par exemple, un produit comme le dichromate de potassium, qui permet de mettre en évidence la présence d'alcool dans une solution, est interdit en classe. Nous ne pouvons donc pas proposer ce type de matériel aux élèves et nous proposons un dispositif alternatif (l'alcootest) qui remplit les mêmes fonctions et que les élèves pourront utiliser lors de la phase de manipulation en classe. Toujours en rapport au matériel, certains dispositifs coûteux et spécifiques de la discipline sont rarement présents dans les établissements, ce qui est le cas notamment des sondes à CO_2 et à l'éthanol. Nous faisons le choix de ne pas les intégrer dans notre situation, ce qui se traduit par la non sélection de ces types de tâches ou valeurs de paramètres. Une autre contrainte découle des attentes institutionnelles en termes de structuration du protocole expérimental qui restent implicites dans les programmes. En effet, l'institution ne propose pas de modèle de référence alors qu'elle précise un canevas général de la démarche d'investigation qui peut être suivi par les enseignants. Nous prenons donc en compte cette lacune institutionnelle dans les guidages relatifs à la structuration du rapport expérimental et du protocole » (Bonnat et al., 2018, p.42).

« La pré-structuration de la partie mode opératoire du protocole permet à la fois d'aider les élèves dans la rédaction d'un protocole communicable, mais aussi d'avoir des traces très fines de l'activité de l'élève : choix des actions et des valeurs de leurs paramètres. Nous faisons donc le choix, dans la conception de la situation, d'utiliser uniquement le modèle d'action qui permet de tracer les choix des élèves, c'est à dire des actions avec titre imposé et contenu structuré (Figure 8) » (Bonnat et al., 2018, p.45).

Transposition et élaboration des guidages fixes

Figure 20 présente la méthodologie de transposition des éléments praxéologiques sélectionnés en éléments du protocole.

La transposition des divers éléments praxéologiques est détaillée ci-après.

- « Les types de tâches sont transposés en étapes du protocole.
- La technique relative à un type de tâches est composée de types de tâches, chacun étant transposé sous la forme d'une action qui contient un titre générique et un contenu pré-structuré. Les paramètres du sous-type de tâches sont transposés en paramètres d'actions qui peuvent prendre différentes valeurs. Les valeurs de paramètres peuvent être fixées ou laissées à la charge de l'élève. Les propositions de choix de valeurs de paramètres des actions, laissées à la charge des élèves, sous la

forme de menus déroulants se réfèrent à des difficultés *a priori* » (Bonnat et al., 2018, p.45-46). Par exemple pour l'action « Porter et maintenir une solution à température » (cf. la Figure 21), l'élève peut soit compléter un champ libre lorsqu'il s'agit de valeurs numériques (comme le volume de solution à prélever), soit sélectionner un paramètre dans une liste comme celle proposée dans la Figure 21, qui donne un choix de solutions. Si les élèves choisissent une solution dépourvue de microorganismes (comme une solution de glucose, saccharose, amidon, de l'eau de chaux, ou de l'eau), cette action révèle une erreur que nous associons à une technologie personnelle (la réaction de fermentation se déroule indépendamment d'un organisme vivant).

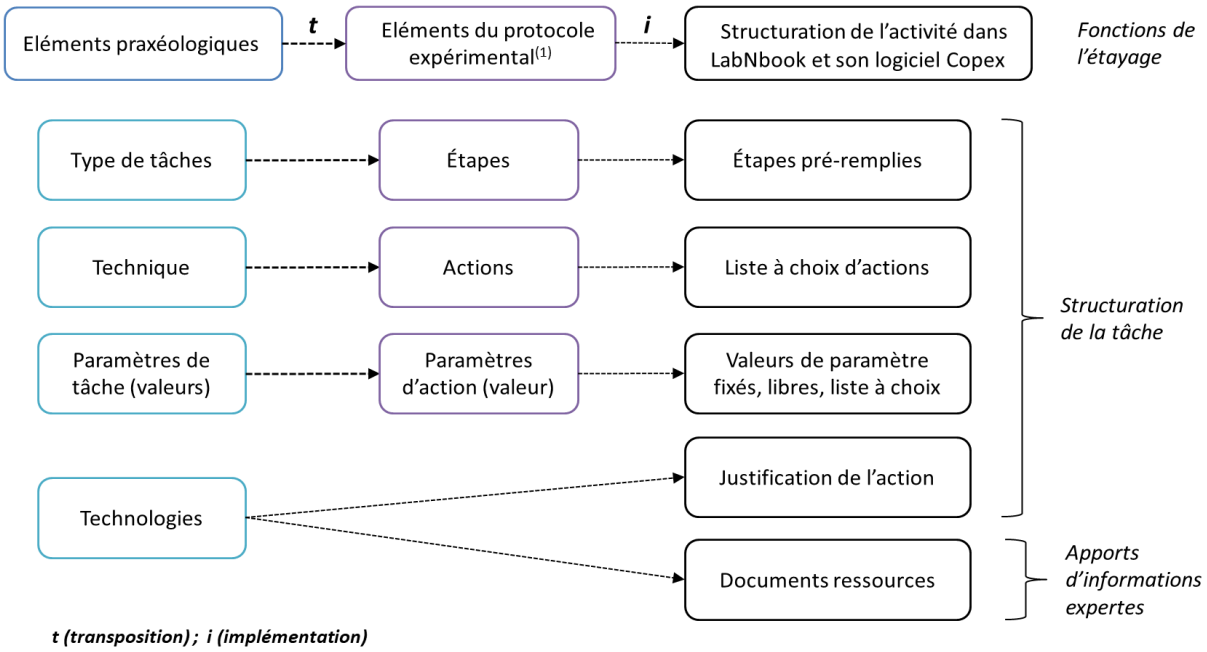


Figure 20. Méthodologie de transposition du modèle didactique en une situation d'apprentissage étayée par LabNbook (Bonnat et al., 2018, p.46).

- « Les technologies qui justifient la technique sont transposées en justifications de l'action, et/ou peuvent être apportées dans les documents ressources selon les concepts en jeu. Pour certaines actions, le choix de l'action ou des paramètres doit être justifié par l'élève, et ce dans la partie commentaire des actions afin de les distinguer des actions du fait de leur fonction.
- Nous avons élaboré des documents ressources pour les élèves, à partir de l'analyse des programmes, des manuels et des attentes par rapport à l'évaluation des capacités expérimentales au baccalauréat » (Bonnat et al., 2018, p.46).

« Les informations de nature conceptuelle devraient aider l'élève dans sa stratégie de résolution à choisir précisément des valeurs de paramètre. L'implémentation de ces éléments du protocole dans l'EIAH et la prise en compte de ses spécificités nous amène à proposer deux types de guidages qui ont comme fonction (1) de structurer la tâche avec l'éditeur de protocole Copex. Les résultats de la transposition nous amènent à proposer aux élèves une structuration de l'activité de conception expérimentale sur la mise en évidence de la fermentation alcoolique en cinq étapes, pour lesquelles nous avons défini dix actions pré-structurées ayant un titre ; (2) d'apporter un guidage scientifique expert sous la forme de documents ressources » (Bonnat et al., 2018, p.47).

La Figure 21 montre un exemple où l'élève a sélectionné dans la liste des actions, celle qui se nomme « Porter et maintenir une solution à température ».

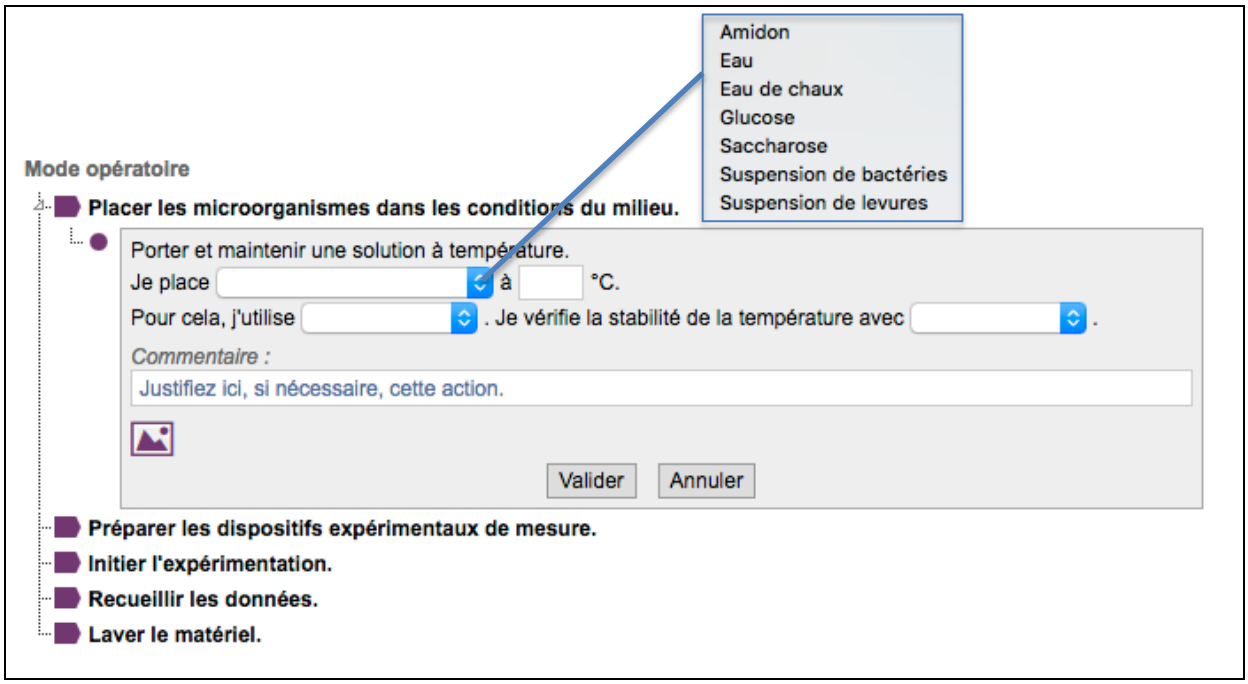


Figure 21. Extrait de la situation proposée dans la plateforme LabNbook sur la fermentation alcoolique, qui montre la tâche d'écriture du mode opératoire (copie d'écran).

Il existe des « écarts de formulation entre les éléments praxéologiques de la modélisation et les éléments du protocole de la situation. En effet, lors de la conception des actions pré-structurées, nous avons parfois fait le choix de regrouper des types de tâches de la praxéologie de référence dans une même action, comme « prélever et verser une solution dans un contenant ». De plus, nous avons adapté les intitulés des types de tâches correspondants de la praxéologie. En effet, les titres des actions doivent être suffisamment génériques pour être utilisés dans différentes étapes, ce qui est le cas par exemple des actions « prélever une solution » ou « fermer un contenant » » (Bonnat et al., 2018, p.52).

A partir de ce travail de transposition et modélisation, nous avons voulu étudier l'appropriation par les élèves de la pré-structuration et l'impact sur les apprentissages associés. Nous avons élaboré « trois situations proposant des niveaux de guidage différents, portant sur la pré-structuration des étapes, des actions et des justifications. Deux expérimentations nous ont permis de tester ces trois situations dans des classes de terminale scientifiques de spécialité SVT, avec comme objectifs de valider l'utilisation par les élèves des pré-structurations proposées, de montrer leur impact sur les apprentissages, sur la pertinence et la communicabilité des protocoles produits par les élèves » (Bonnat et al., 2018, p.58).

Méthode et résultats de la première expérimentation

Elle a permis de comparer une version de Copex avec des actions structurées (comme dans la Figure 21) à une version contrôle qui possède des étapes imposées mais des actions libres. 40 élèves de terminale S ont été répartis aléatoirement dans ces deux groupes : 21 élèves ont travaillé sur la situation expérimentale (N2), alors que 19 élèves se sont retrouvés dans la situation de contrôle (N1). Un pré-test et un post-test, encadrant la conception de l'expérience, ont permis de tester les connaissances des élèves sur les notions en jeu. Nous avons analysé les protocoles écrits par les élèves en nous référant aux critères de communicabilité et de pertinence d'évaluation d'un protocole expérimental (Tableau 1). Cette analyse donne les résultats suivants.

- Il n'y a pas de différence significative entre les groupes N1 et N2 en termes d'apprentissage.
- Si on considère la communicabilité, les protocoles de N2 sont meilleurs que ceux de N1.
    - Le nombre d'élèves n'ayant mis aucune action dans une étape diminue dans N2 par rapport à N1. Ainsi, la structuration des actions facilite l'écriture d'actions par les élèves.

    - Les actions des protocoles avec actions libres (N1) ne sont pas suffisamment paramétrées, alors que dans N2, les élèves choisissent une valeur pour les paramètres proposés.
- Quant à la pertinence des protocoles, les résultats indiquent des protocoles plus pertinents (technique de résolution experte) dans N2 que dans N1.
    - Néanmoins, si on regarde seulement les actions (sans analyser les paramètres), seulement 5 protocoles (sur 21) sont qualifiés d'experts pour les élèves du groupe N2, contre 0 (sur 19) pour le groupe N1.
    - Le nombre de valeurs de paramètre correctes par rapport à ce qui est attendu est en moyenne de 79% pour les protocoles types N2, contre 61% pour N1. Il est intéressant de noter que les valeurs de paramètres incorrects dans les protocoles type N2 sont les mêmes que les valeurs absentes des protocoles N1.
- Cette première expérimentation a aussi montré une des « limites de la méthodologie de transposition proposée car il existe des écarts entre le modèle praxéologique et la situation implémentée pour certaines actions. En effet, la praxéologie décrit précisément l'activité de l'élève sous la forme de types de tâches « simples », correspondant à un geste manipulatoire indépendant (par exemple, T : fermer le contenant). La transposition stricte de ce modèle aurait dû nous conduire à proposer une liste à choix d'actions « simples ». Or dans notre situation nous avons proposé une action « double » qui résulte de la transposition de deux types de tâches distincts (T : prélever une solution et T : verser une solution dans un contenant). Nous justifions ce choix par une contrainte liée au type d'activité proposée. En effet, la conception expérimentale peut traduire des gestes manipulatoires dépendant des contraintes du milieu. Dans cet exemple, le geste qui consiste à prélever avec une pipette un certain volume de solution est couplé au geste qui consiste à verser ce volume dans un contenant. Concrètement en salle de travaux pratiques, la rétroaction du milieu (pipette remplie) associe implicitement deux gestes manipulatoires ce qui rend les deux actions dépendantes l'une de l'autre. Nous faisons l'hypothèse que les élèves ne décomposent pas ce geste qu'ils considèrent comme étant une seule et même action. Nous avons donc fait le choix, dans un premier temps, de regrouper et de transposer ces deux gestes manipulatoires dépendants sous la forme d'une seule action du protocole afin de donner davantage de sens à l'action » (Bonnat et al., 2018, p.56).

Méthode et résultats de la deuxième expérimentation

Les résultats de la première expérimentation nous ont incité à tester deux types de transpositions : l'une avec uniquement des actions dites « simples » (une seule tâche) (N2a, 26 élèves) et l'autre avec des actions « multiples » (qui regroupent plusieurs tâches) quand c'était pertinent (N2b, 25 élèves). Nous avons regardé la différence entre ces deux conditions expérimentales sur la communicabilité et la pertinence des protocoles. Cela conduit aux résultats suivants.

- La structuration des actions favorise l'écriture d'un protocole communicable dans les deux situations expérimentales, mais les protocoles de type N2b se rapprochent davantage d'un protocole expert.
    - Les élèves écrivent un protocole plus complet dans la condition N2b, par rapport à N2a. En effet il y a en moyenne 8,9 actions sur les 21 attendues dans un protocole de type N2a alors qu'il y a 8,5 actions sur 14 attendues dans la condition N2b.
    - Les élèves ont quelques difficultés à s'emparer des actions proposées, principalement dans N2a : 12 protocoles ont au moins une action libre (condition N2a) contre 6 protocoles pour N2b. L'utilisation d'action libre indique qu'ils n'ont pas toujours trouvé de sens aux actions proposées.
- La structuration en action « multiples » (N2b) favorise davantage l'écriture d'un protocole pertinent.
    - Si nous regardons uniquement l'étape 1, nous trouvons 9 protocoles sur 25 qualifiés d'experts dans la condition N2b, alors qu'il y a 0/26 protocole dans N2a.

- De même si on regarde spécifiquement un paramètre d'une action de l'étape 1 qui a posé des difficultés dans l'expérimentation 1 (choix des volumes de solution de glucose et de suspension de levure qui doivent être en adéquation), 10 élèves sur 25 choisissent des volumes corrects dans la condition N2b, contre 5 élèves sur 26 pour N2a.
- Néanmoins ces résultats impliquent que des difficultés subsistent quant à la pertinence des actions et paramètres.

En conclusion, les résultats de l'étude menée dans le cadre de la thèse de Catherine Bonnat (2017) ont montré la pertinence du modèle praxéologique pour concevoir une situation d'apprentissage étayée par l'EIAH. En effet, ce cadre permet de décrire finement l'activité de l'élève, ce qui rend possible l'identification des tâches destinées aux élèves au sein d'une institution, avant transposition dans l'EIAH. L'analyse croisée des conceptions et des obstacles avec la modélisation praxéologique rend compte des possibles difficultés des élèves, ce qui participe à la réalisation de guidages ciblés sur certains concepts. Des élèves réussissent à s'approprier dans Copex des actions structurées, pour proposer un protocole communicable. Il est cependant préférable de proposer des actions « multiples », ce qui peut se comprendre car ces actions sont porteuses de plus de sens pour les élèves. Néanmoins, dans ces conditions la pertinence des protocoles n'est pas satisfaisante car nous avons pu repérer des erreurs tenaces identifiées dans la littérature. Un guidage adaptatif avec des rétroactions personnalisées pourrait aider les élèves à écrire des protocoles plus proches de ce qui est attendu par l'institution.

5.3.3. TitrAB

Ce logiciel comporte à la fois un guidage fixe et un guidage adaptatif. Dans cette partie, est développé uniquement ce qui concerne le guidage fixe.

Dans TitrAB, le guidage fixe correspond à la présentation directe d'informations de Zacharia et al. (2015) et à une forte structuration de l'activité de conception expérimentale.

La structuration de la tâche se décline de façon différente de ce qui existe dans Copex-chimie et Copex.

- Les étapes du protocole expérimental ne sont pas visibles directement, mais correspondent à des zones placées autour du dispositif expérimental. Deux zones supplémentaires, correspondant à deux étapes liées à la dilution de solution, apparaissent sur demande lorsque l'élève coche une des cases « diluée auparavant » (voir la Figure 9).
- Les actions sont déjà écrites et seules les valeurs de paramètres doivent être spécifiées par les élèves. De la même façon que ce qui existe dans Copex avec les actions structurées, les élèves doivent soit sélectionner une valeur de paramètre dans une liste à choix, soit écrire un nombre pour spécifier les volumes de solution.

En plus de la structuration, d'autres guidages fixes existent. Il s'agit d'informations de deux types.

- Des documents de cours sont mis à disposition des élèves. Il s'agit de « Notions de base sur les titrages », qui relèvent de notions théoriques et de « Comment élaborer le protocole d'un titrage acide-base » et « Comment diluer une solution », qui donnent des éléments de technique de résolution de la tâche ainsi que quelques éléments technologiques.
- Pour chaque solution, verrerie et matériel de mesure mis à disposition, des informations sont données quand on passe la souris sur les noms, pour aider les élèves dans le choix des matériels. Il s'agit d'éléments d'ordre technique (par exemple, dans la liste du matériel, quand on passe sur le bécher de 100 mL, il est écrit « contient le milieu réactionnel » ou d'ordre technologique (par exemple, dans la liste du matériel, le texte associé à une pipette est « délivre un volume précis de solution »).

5.4. Guidages adaptatifs dans nos travaux sur la conception expérimentale

Le guidage adaptatif présent dans nos EIAH repose sur un diagnostic préalable de l'activité des élèves. Nous avons choisi un système de diagnostic par contraintes qui évalue la proposition de l'élève. Ce diagnostic est basé sur un système de doubles contraintes (contrainte de satisfaction et contrainte de validité), tel que décrit par Ohlsson (1992). La contrainte de satisfaction détermine si une erreur est présente dans le protocole ; la contraine de validité précise pour quel(s) état(s) du protocole une contrainte doit être vérifiée. Avec ce sytème de diagnostic, les erreurs les plus courantes faites par un élève sont détectées, même s'il n'existe pas un protocole unique considéré comme correct. De plus, seulement un état du protocole est utilisé pour le diagnostic, sans avoir recours au processus complet qui a été nécessaire pour créer un état. Ainsi ce système de diagnostic est bien adapté pour un travail de conception expérimentale, dans lequel il n'existe pas de stratégie pré-définie de résolution, ni de solution correcte unique,

Le diagostic étant réalisé, le système fourit une rétroaction à l'élève lui donnant des informations sur les erreurs détectées, ce qui correspond à un retour sur la réussite.

5.4.1. Études avec Copex chimie

En plus de la structuration décrite précédemment, un guidage adaptatif est proposé dans Copex-chimie.

5.4.1.1. Présentation des guidages adaptatifs dans ce logiciel

A partir du diagnostic, le système fournit une rétroaction composée de deux types d'information : (1) les résultats expérimentaux correspondant au protocole proposé par l'élève et/ou (2) les erreurs détectées dans le protocole par le tuteur artificiel.

Guidage par rétroactions de résultats empiriques simulés.

À tout moment dans leur travail et sans limitation, les élèves peuvent demander au système de fournir les résultats expérimentaux correspondant à l'expérience qu'ils ont conçue jusque-là. Ces résultats sont simulés par une simulation spectrophotométrique et correspondent à des valeurs d'absorbance ou des spectres d'absorbance (voir la Figure 3, cadre 5). Le calcul de ces données est possible grâce à la structuration du protocole avec des actions qui comportent des paramètres à sélectionner ou des valeurs de paramètres à spécifier. La simulation est capable de sélectionner les valeurs des paramètres d'actions nécessaires pour les calculs. En raison de la diversité des protocoles que les élèves peuvent produire, la simulation n'est pas capable de simuler n'importe quel résultat. En fait, le tuteur artificiel (voir section suivante) détermine si le protocole est en accord avec le domaine de validité de la simulation. Si c'est en accord, alors les résultats sont fournis aux élèves. Ainsi, nous considérons ces résultats simulés comme un guidage par rétroaction car ils donnent une information sur la réussite : pas de résultats fournis si le protocole n'est pas adapté.

Ensuite, les élèves doivent traiter les résultats pour répondre à la question initiale « Dosage du colorant E124 dans le sirop de grenadine ». Pendant ce traitement, les élèves doivent évaluer la validité de leurs résultats.

Guidage par rétroactions sur les erreurs des élèves

Une rétroaction, fournie par un tuteur artificiel, est accessible à la demande de l'élève. Le tuteur évalue les trois étapes du protocole avec un jeu de contraintes. Un exemple de contrainte de satisfaction utilisée dans copex-chimie est « Est-ce que les solutions étalons sont prréparées avec le composé à mesurer et le solvent adéquat ? ». Cette contrainte de satisfaction ne doit être explorée que si l'élève a préparé une soluton dans la première étape « Préparation des solutions de la gamme étalon », ce qui correpsond à une contraite de validité.

Une fois le diagnostic réalisé, le tuteur artificiel signale à l'élève les erreurs détectées dans le protocole. L'espace de retour du tuteur se trouve sous le protocole (voir la Figure 3, cadre 4), qui n'est visible que lorsque l'élève sélectionne le bouton avec le bonhomme. L'enseignant peut régler le tuteur artificiel de deux façons : le nombre total d'accès au tuteur peut être limité pendant la session et le niveau de détail décrivant l'erreur peut être ajusté selon trois options comprenant plus ou moins de détails sur l'erreur. Cela fait écho aux travaux de Baker et al. (2004), Karavirta et al. (2006), Vaessen et al. (2014) que nous discuterons dans la partie 5.4.6 dédiée à l'impact des guidages sur les apprentissages et les stratégies des étudiants utilisant Copex-chimie.

- A propos du nombre d'accès au tuteur, la Figure 3 indique une limitation à 99, avec un nombre d'accès déjà utilisé de 63.
- Il existe un guidage graduel autour des erreurs répérées par le tuteur artificiel, qui correspondent à trois niveaux de guidage présentés dans la Figure 22.
    - Le niveau 1 est global et montre l'avancement pour chaque étape via des jauges.
    - Le niveau 2 fournit pour chaque étape, le nombre d'erreurs par catégories (en appuyant sur le bouton +). Nous avons organisé les erreurs en six catégories : objectif non réalisé, problème pratique, rinçage, gamme étalon, homogénéisation, spectrophotomètrie.
    - Le niveau 3, accessible via le niveau 2 en appuyant sur le +, donne des détails pour chaque erreur avec des informations aidant à résoudre la tâche. De plus un point d'interrogation permet d'accéder à une page de cours en lien avec l'erreur détectée. Il est à noter que l'élève peut aussi accéder aux pages de cours directement, sans le tuteur.
- Il est possible de donner accès aux élèves aux trois niveaux, ou de limiter l'accès au niveau 1 ou aux niveaux 1 et 2. Par rapport aux catégories de guidage proposées, les niveaux 1 et 2 correspondent à des rétroactions qui informent sur la réussite, tandis que le niveau 3 s'inscrit dans la catégorie des heuristiques (explications).

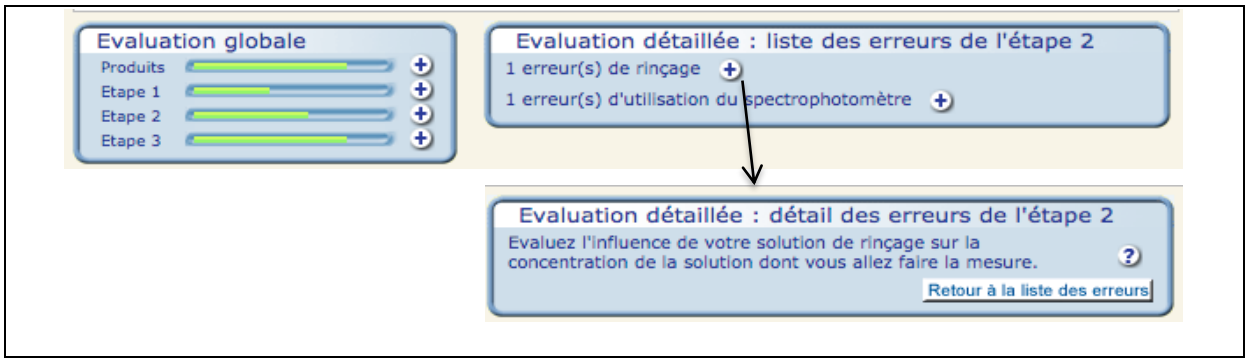


Figure 22. Retours du tuteur artificiel, disponibles à la demande avec le niveau 1 (à gauche), le niveau 2 en haut à droite et le niveau 3 en bas à droite.

Contenu des messages correspondant au guidage du niveau 3

Le contenu de ces messages est basé sur le modèle praxéologique, en considérant deux critères.

- Activité de l'élève : il existe deux niveaux de diagnostic. Tout d'abord, on regarde les ingrédients de la technique à haut niveau pour voir si toutes les tâches qui composent la technique sont présentes (l'hypothèse sous-jacente est celle d'une tâche manquante). Puis au deuxième niveau de diagnostic, on regarde pour chaque tâche présente, l'exécution de la technique. Cela permet de repérer une tâche exécutée avec une technique incorrecte (c'est à dire, la valeur d'un paramètre dans le protocole est inadéquate).

- Enjeu d'apprentissage : la tâche et la technique en lien avec l'erreur sont-elles considérées comme objectif d'apprentissage dans l'enseignement visé ?

A partir des deux critères, activité de l'élève et enjeu d'apprentissage, la stratégie suivante est adoptée pour envoyer un message à l'élève (voir aussi le Tableau 8). Pour une tâche non considérée, le message renvoie vers le type de tâche correspondant (e.g. *Complétez cette étape, il n'y a aucune mesure spectro faite sur une solution de la gamme étalon*) ; pour une tâche exécutée avec une technique incorrecte (c'est à dire, la valeur d'un paramètre dans le protocole est inadéquate), la rétroaction est différente selon l'enjeu d'apprentissage. Si la tâche est en lien avec un objectif d'apprentissage, un message est donné au niveau technologique dans le but de faire réfléchir l'élève sur les connaissances derrière la tâche (*e.g. Évaluez l'influence de votre solution de rinçage sur la mesure spectrophotométrique*). Si la tâche n'est pas associée à un objectif d'apprentissage, le message correspond à un niveau technique pour faciliter le succès de la tâche (*e.g. Vous devez homogénéiser et transférer vos solutions immédiatement après les avoir préparées car vous n'avez qu'une seule fiole jaugée*).

Caractéristique de l'erreur	**Contenu du message de la rétroaction**
Tâche non considérée	Message au niveau du type de tâches en lien avec la tâche non considérée
Technique incorrecte / objectif d'apprentissage	Exprimer la tâche dont la technique est incorrecte et fournir des conseils au niveau technologique.
Technique incorrecte / non objectif d'apprentissage	Exprimer la tâche dont la technique est incorrecte et fournir des conseils au niveau technique.

Tableau 8. Stratégie adoptée pour produire les messages de rétroactions à partir de caractéristiques de l'erreur et l'analyse praxéologique de l'activité de l'élève.

Les principes suivis pour créer les messages de rétroaction sont en cohérence avec les recommandations de Ohlsson (1996) pour la correction d'une erreur. Cet auteur recommande qu'un système informe un apprenti quand il fait une erreur. D'après lui, la formulation d'une instruction verbale est importante et ces instructions doivent être basées sur les caractéristiques de la situation qui a conduit à la décision plutôt que sur l'action en elle-même. Il s'agit de la position que nous avons adoptée dans Copex-chimie pour les erreurs en lien avec des objectifs d'apprentissage, car le tuteur ne dit pas ce qu'il faut faire mais fait réfléchir l'élève au niveau technologique afin que l'élève se demande pourquoi l'action est inappropriée. Si on se réfère au travail de Reiser (2004), les messages donnés par le tuteur à un niveau technologique correspondent au deuxième mécanisme de guidage décrit par cet auteur « Problématiser le sujet », tandis que les messages donnés au niveau technique facilitent la tâche de l'apprenant.

Nous venons de décrire une stratégie de guidage adaptatif car l'aide répond à un besoin individuel de l'élève. Cependant, tels que ces guidages sont proposés dans le logiciel, ils ne correspondent pas à un étayage tel que défini au préalable, car le désétayage n'est pas pris en charge.

5.4.1.2. Évaluation de l'impact des guidages sur la réussite des élèves à concevoir une expérience dans Copex-chimie

Nous avons testé différentes conditions de guidage afin de répondre à la question de recherche suivante : quelle(s) conditions(s) de guidage permet(tent) à des élèves de réussir lors de leur conception expérimentale.

a- Méthode expérimentale

L'étude a été réalisée à l'université de Grenoble (France) en janvier 2010 avec 39 étudiants inscrits dans un parcours scientifique de licence 1. Le contexte est un enseignement interdisciplinaire autour du thème

de l'eau, avec un focus sur l'expérimental. Cet enseignement implique cinq disciplines et comporte huit séances de travaux pratiques (TP) avec des séances préparatoires ainsi que des séances de synthèse après les TP. Cette étude porte sur une des séances préparatoires au TP, séance qui dure 120 minutes pendant laquelle les étudiants doivent écrire individuellement un protocole expérimental pour déterminer la concentration en E124 dans un sirop de grenadine par une méthode spectrophotométrique. L'enseignant présente rapidement le travail à faire et laisse les étudiants travailler individuellement, sans répondre à leurs questions (sauf celles d'ordre technique). Les étudiants possèdent des connaissances sur ce sujet car ils ont déjà étudié ce type de dosage l'année précédente. De plus des rappels de cours ont été donnés dans une séance précédente.

Nous testons la situation de conception expérimentale avec trois conditions expérimentales.

Dans le premier groupe (sans copex), 9 étudiants travaillent sans Copex-chimie. Des documents et informations, similaires à ceux trouvés dans Copex-chimie, sont donnés aux étudiants.

- L'objectif détaillé.
- Le principe de la méthode.
- Le matériel et les produits disponibles.
- L'ordre de grandeur du coefficient d'extinction molaire.
- Un cours avec des informations d'ordre procédural et théorique.
- Une structuration du protocole en étapes.

Dans le deuxième groupe (copex-sans-tuteur), 16 étudiants utilisent Copex-chimie sans le tuteur artificiel. Ces étudiants disposent du guidage fixe de structuration, le guidage adaptatif étant limité aux rétroactions de résultats empiriques simulés.

Le troisième groupe (copex-tuteur) correspond à 14 étudiants ayant accès à Copex-chimie et son tuteur sans limitations (accès illimité avec les 3 niveaux de rétroaction), en plus des guidages du deuxième groupe.

Une limite de cette étude est que nous ne pouvons distinguer l'impact du guidage de structuration par les actions de l'effet du guidage par rétroaction due aux résultats empiriques simulés. Ces deux guidages ont été introduits simultanément au groupe « copex-sans-tuteur », par rapport au groupe « sans copex ». Pour avoir des éléments de réponse à cette question, nous avons exploré l'utilisation des résultats simulés par les étudiants dans les deux groupes utilisant Copex-chimie.

Le Tableau 9 résume les différentes conditions de guidage des trois groupes d'étudiants.

		Groupes		
		Sans Copex-chimie (sans copex)	Copex-chimie sans tuteur (copex-sans-tuteur)	Copex-chimie avec tuteur (copex-tuteur)
		9 étudiants	16 étudiants	14 étudiants
Guidages	Structuration : niveau étapes	+	+	+
	Structuration : niveau actions	-	+	+
	Rétroactions : résultats empiriques, simulés	-	+	+
	Rétroactions : erreurs	-	-	+

Tableau 9. Trois groupes d'étudiants avec différentes conditions de guidage : (+) le guidage est présent ; (-) le guidage est absent.

Voir la publication de Girault et d'Ham (2014) pour le détail sur les données collectées et le détail des résultats. Seulement la discussion des résultats est présentée ici.

b- Résultats sur le guidage par structuration du protocole expérimental (guidage fixe)

L'effet de la structuration au niveau des étapes n'a pas été évalué car ce guidage est fourni aux trois groupes d'étudiants. L'impact de la structuration au niveau des actions et des paramètres associés est évalué en comparant les groupes « sans copex » et « copex-sans-tuteur ». En effet, les résultats ont montré que la différence entre ces deux groupes pouvait davantage être attribuée à la structuration qu'à la rétroaction par les résultats empiriques simulés, car la simulation n'est pas très utile pour les étudiants du groupe « copex-sans-tuteur ». Ces derniers semblent utiliser la simulation dans un but de validation mais la qualité de leur protocole ne leur permet pas d'obtenir les résultats simulés attendus.

Cette étude montre que certains étudiants passent plus de temps à concevoir leur expérience quand ils sont dans les conditions « copex-sans-tuteur » mais que d'autres se découragent, probablement par manque de rétroactions. Les scores de réussite à la tâche indiquent une petite amélioration lorsque Copex-chimie est utilisé sans tuteur, par rapport à la situation sans logiciel (sans copex), mais ce guidage ne semble pas suffisant pour atteindre une importante réussite (protocole pertinent). En revanche, même si le protocole n'est pas pertinent, il est plus complet lorsque les étudiants utilisent le logiciel dans les conditions « copex-sans-tuteur ». Cela signifie que la liste des actions doit les aider à penser à ce qu'ils doivent écrire dans leur protocole. Ce guidage force les étudiants à rentrer dans la complexité du problème, même si des techniques incorrectes apparaissent quand ils donnent davantage de détails. Cela est à comparer avec les travaux de Jordan et al. (2011) qui ont trouvé que les outils (une liste de matériel disponible) fournis aux étudiants novices guident fortement leur conception expérimentale. L'inconvénient est que cela peut limiter leur créativité et les étudiants tendent à être guidés par l'achèvement de la tâche.

c- Résultats sur le guidage par rétroactions sur les erreurs des étudiants (guidage adaptatif)

L'effet de ce guidage est analysé en comparant les résultats du groupe « copex-sans-tuteur » avec ceux du groupe « copex-tuteur ». Ces derniers étudiants semblent ne pas se décourager car ils passent du temps à écrire et modifier leur protocole en demandant de l'aide du tuteur (en moyenne le tuteur est sollicité 32 fois) tout en réussissant à écrire un bon protocole. Le tuteur semble avoir un impact positif à la fois sur la complétude des protocoles (qui renforce l'effet de la structuration au niveau des actions), ainsi que sur la pertinence de leur production. Ce type de guidage a le pouvoir d'individualiser la rétroaction, ce qui est un vrai challenge pour les tuteurs artificiels (Reiser, 2004).

De plus, les étudiants du groupe « copex-tuteur » profitent davantage de la simulation en combinaison avec les rétroactions sur leurs erreurs car cela les aide à aborder le critère d'exécutabilité avec le domaine de validité de la simulation.

Par ailleurs, nous avons étudié l'influence du paramétrage du tuteur sur la réussite à la tâche des étudiants et sur leurs stratégies employées. Les résultats montrent qu'il est important de limiter l'accès au tuteur pour éviter des stratégies de type essai-erreur (12 accès semblent un bon compromis dans le cadre de ce logiciel) et qu'il est nécessaire de fournir aux étudiants les trois niveaux de guidage (publication en cours d'écriture, résultats détaillés dans la partie suivante).

5.4.1.3. Évaluation de l'impact des guidages sur les apprentissages et stratégies des étudiants au cours d'une activité de conception expérimentale dans Copex-chimie

Au-delà de la réussite à l'activité, il est important de savoir ce que les étudiants apprennent. Nous avons ainsi mené une étude afin de répondre à la question de recherche suivante : quelles sont les conditions de guidage dans Copex-chimie qui conduisent aux meilleurs résultats pour les étudiants, en termes d'apprentissage et de performance, c.à.d. la qualité de leur production ? En accord avec les études de la

littérature présentées au préalable, nous avons étudié le type de guidage fourni, avec un accès ou non à un guidage réflexif. Nous avons également étudié l'impact du nombre d'accès au tuteur sur la performance et l'apprentissage et recherché une éventuelle stratégie de détournement du système, suite à la littérature sur les STI (voir section 5.2.).

Nous avons alors testé trois hypothèses de recherche.

- (Hyp 1) fournir des conditions de guidage maximal (nombre d'accès illimité au tuteur et trois niveaux d'information) favorise la performance et dans une moindre mesure l'apprentissage.
- (Hyp 2) limiter le nombre d'accès possibles au tuteur a un impact négatif sur la performance mais facilite l'apprentissage.
- (Hyp 3) limiter le nombre d'accès possible au tuteur facilite l'apprentissage car un comportement de type détournement du système est rendu plus difficile.

a- Méthode mise en œuvre dans Copex-chimie

Nous avons mesuré l'apprentissage en utilisant un test de connaissances. Ce test a été conçu sur la base de l'analyse praxéologique de l'activité des étudiants dans Copex-chimie (Girault & d'Ham, 2014). Ainsi le test est composé de 22 questions qui évaluent huit types de tâches, les questions portant sur le niveau technique ou technologique associé à chaque type de tâches, sous forme de QCM et de questions ouvertes demandant de justifier leur réponse par un petit texte. Par exemple le type de tâches « choisir la nature de l'échantillon à mesurer » est évalué avec deux questions de type QCM.

- La première au niveau technique, qui évalue l'utilisation de la technique correcte « l'échantillon à mesurer est la solution de concentration inconnue », (à savoir dans le QCM le sirop de menthe) :

  Vous faites le dosage du colorant E131 (bleu patenté) dans un sirop de menthe. Dans cette optique, vous utilisez une gamme étalon. La concentration en E131 à déterminer est déduite de la mesure d'absorbance faite sur un échantillon. A partir de quelle(s) solution(s) préparez-vous l'échantillon (cochez une seule case) ?

  ☐ mélange équimolaire de E131 et de sirop de menthe *☐ solution de E131* *☐ sirop de menthe* *☐ ne sait pas*

- La deuxième au niveau technologique qui évalue l'utilisation de la technologie suivante « à partir de la valeur mesurée, il sera possible de déterminer la concentration dans l'échantillon par comparaison avec les mesures de la courbe étalon (donc dans le QCM, il faut cocher faux pour la question a et vrai pour la question b) :

  Vous faites un dosage spectrophotométrique du E131 dans un échantillon de sirop de menthe. Pour cela, vous utilisez un étalon préparé à partir de E131. (Cochez une seule case par ligne : vrai / faux / ne sait pas) :

  a. La concentration de l'étalon est déterminée par la mesure de son absorbance
  b. Pour déterminer la concentration dans l'échantillon, il faut comparer l'absorbance de l'échantillon à l'absorbance de l'étalon

Le même test est donné à tous les étudiants, quelles que soient les conditions de guidage, lors d'un pré-test (séance de TD avant le travail sur Copex-chimie) et d'un post-test (à la fin de la session sur Copex-chimie, quelques jours après le pré-test). Le test est corrigé en appliquant un poids équivalent à chaque technique et technologie d'un type de tâches.

Les étudiants sont divisés en trois groupes correspondant à trois conditions de guidage (voir le Tableau 10). Un groupe contrôle a accès au tuteur de façon illimitée et aux trois niveaux d'information (tuteur complet) ; un premier groupe expérimental est limité dans le nombre d'accès possible au tuteur, en ayant une autorisation de 12 accès (nb. accès limité) ; dans un deuxième groupe expérimental, les étudiants ont uniquement accès à la rétroaction de niveau 1 sous forme de jauge (info limitée) (voir la Figure 22). L'attribution des étudiants dans les trois groupes s'est effectuée par échantillonnage aléatoire stratifié.

Les caractéristiques utilisées pour définir les strates sont le sexe, la spécialité (biochimie, chimie ou géologie), le redoublement, niveau initial en chimie obtenu lors de l'examen du module de chimie du semestre précédent (faible ou élevé).

	Groupe « tuteur complet »	*Groupe « nb. accès limité »*	*Groupe « info limitée »*
	40 étudiants	42 étudiants	46 étudiants
Accès au tuteur	Illimité	12 maximum	Illimité
Type de guidage disponible	Niveaux 1, 2 et 3	Niveaux 1, 2 et 3	Niveau 1

Tableau 10. Trois groupes d'étudiants avec différentes conditions de guidage : paramétrage du tuteur dans Copex-chimie.

L'indicateur pour le gain d'apprentissage est le résultat de la différence du score du post-test moins celui du pré-test.

Nous avons également pris en compte quatre indicateurs extraits des fichiers de traces, les traces étant composées de séquences d'évènements décrivant l'interaction d'un utilisateur avec le logiciel pendant une session de travail.

- *La performance*. Le protocole est évalué par le système de tutorat chaque fois que l'étudiant demande une évaluation du tuteur. Celui-ci calcule un score de réussite (sur 20) pour le protocole en soustrayant le score alloué à chaque erreur présente, du maximum de points. Nous considérons la performance, comme étant pour un élève donné, le rapport du score de réussite le plus élevé que le système de tuteur a attribué à son protocole expérimental, divisé par le temps de travail de l'étudiant sur une session (un exercice). Si un étudiant a obtenu un score de 20/20, le temps de travail n'est pas le temps de toute la session, mais le temps nécessaire pour atteindre le score de 20.
- *Le nombre d'accès au tuteur* : il correspond au nombre de fois qu'un étudiant demande de l'aide du tuteur artificiel.
- *La fréquence de modifications* : c'est le nombre d'évènements dans les traces qui correspondent à une modification du protocole (ajouter, supprimer, modifier, déplacer une action dans le protocole), divisé par le temps de travail de l'étudiant sur une session.
- *La fraction du tuteur vers l'information* représente la proportion d'utilisation du tuteur comme source d'information (accès au niveau 3) par rapport à se contenter de voir le nombre d'erreurs (niveau 2) dans un but de validation du protocole. Cet indicateur est calculé en additionnant deux motifs d'utilisation du guidage qui sont « demander de l'aide au tuteur suivi de lire les messages détaillés (niveau 3) » et « demander de l'aide au tuteur suivi d'explorer les liens de cours », le tout divisé par le nombre d'accès au tuteur.

Analyse statistique à partir des indicateurs

Les résultats du test de connaissance suivent une distribution normale, mais les variances sont inhomogènes. Ainsi nous utilisons le test t de Welch pour évaluer s'il y a apprentissage en comparant les scores des post-test et pré-test. Tous les autres indicateurs ne suivent pas une distribution normale et les variances ne sont pas homogènes. Cela implique l'utilisation de méthodes d'analyse non-paramétriques. Ainsi pour évaluer la différence entre les groupes, nous utilisons l'analyse de variance par rang uni-variée de Kruskal-Wallis. La corrélation entre les indicateurs est évaluée par le coefficient de corrélation de rang de Spearman.

b- Résultats sur l'apprentissage

Nous avons commencé par une étude exploratoire concernant la corrélation entre le nombre d'accès au groupe tuteur et le gain d'apprentissage dans le groupe « tuteur complet » qui correspond au groupe qui a accès à tous les guidages et au tuteur de façon illimitée. Le diagramme de distribution correspondant est représenté sur la Figure 23.

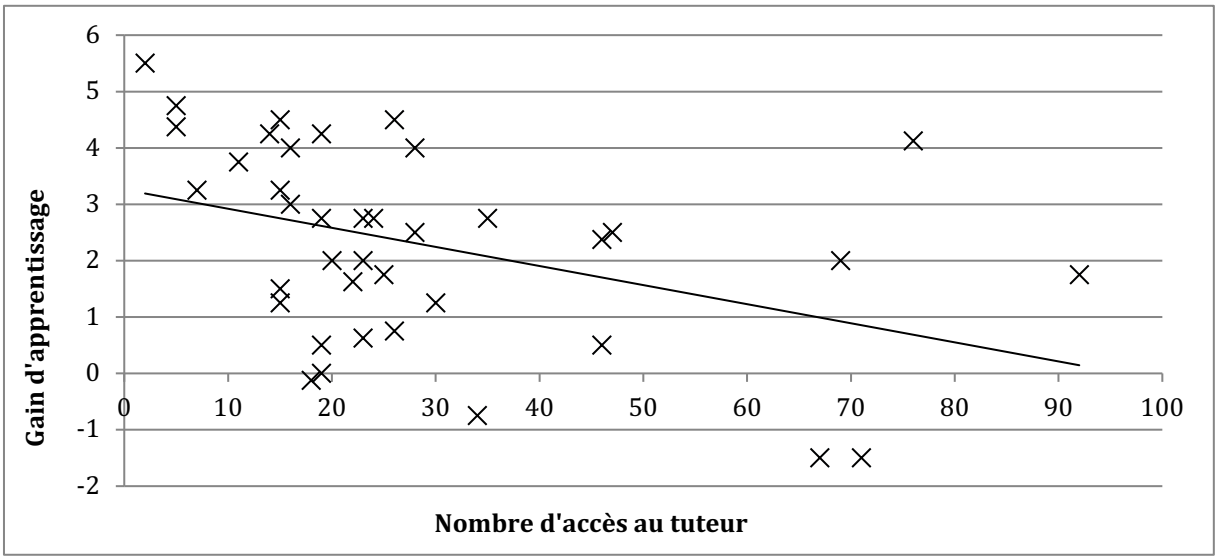


Figure 23. Gain d'apprentissage des étudiants tracé en fonction du nombre d'accès au tuteur artificiel.

Pour le gain d'apprentissage, il y a une corrélation négative avec le nombre d'accès au tuteur (coefficient de corrélation de Pearson ρ=-0,46, p<1%). Une corrélation linéaire semble appropriée pour ce diagramme de corrélation. Ce résultat indique qu'accéder fréquemment au tuteur n'est pas un indicateur de gain d'apprentissage. Aucune relation de causalité ne peut être inférée de ce résultat. Nous supposons qu'un fort gain d'apprentissage et un contrôle de l'accès au tuteur pourrait être la conséquence de la motivation des étudiants vis à vis de leurs apprentissages. Cela fait écho aux travaux de Vaessen et al. (2014) qui montrent que lors d'une tâche complexe, un étudiant qui est motivé pour apprendre et se donne comme objectif de maitriser le contenu étudié, utilise un minimum d'assistance pour compléter la tâche par lui-même. Cela voudrait dire que ces étudiants se limitent dans leur demande d'aide car ils pensent pouvoir mieux apprendre s'ils continuent à essayer par eux-mêmes.

Nous avons ensuite évalué le nombre d'accès au tuteur, la performance et le gain d'apprentissage pour les trois groupes étudiés (voir le Tableau 11). Dans ce tableau sont aussi reportés les résultats du test de Kruskal Wallis pour comparer les groupes deux à deux.

Le nombre d'accès réel au tuteur pour le groupe avec le nombre d'accès limité est en moyenne de 7,3 ce qui est inférieur au nombre de 12 autorisé. Ces étudiants ont donc tendance à se retreindre. Pour le groupe info limitée, la moyenne d'accès au tuteur est de 35, ce qui est supérieur au 28 accès du groupe tuteur complet. Ce résultat signale à quel point ces étudiants recherchent de l'aide quand ils conçoivent une expérience avec aussi peu d'information que les jauges.

A propos de la performance, nous avions fait l'hypothèse (hyp 1) que les étudiants bénéficieraient de l'accès illimité au tuteur et de l'information fournie dans le guidage maximal. C'est effectivement le cas puisque l'indicateur de performance est le plus important pour le groupe tuteur total, suivi du groupe nb. accès limité, puis du groupe info limitée. Néanmoins, nous ne pouvons confirmer l'hypothèse 2 sur la performance car le fait de limiter le tuteur à 12 accès ne diminue pas la performance de façon significative (cf. comparaison tuteur complet / nb. accès limité), alors que les étudiants ayant seulement

le guidage de niveau 1 (info limitée) ont une performance significativement plus faible (p<1%) que les étudiants des autres groupes. Cela implique que le contenu du guidage est plus important pour réussir la tâche que le nombre d'accès à ce guidage. Nous avions déjà montré (Girault & d'Ham, 2014) que pour réussir dans une tâche complexe comme celle dans Copex-chimie, les étudiants ont besoin de guidage fixe et adaptatif aussi détaillé que possible.

	Moyenne (écart type)			Test de Kruskal Wallis		
	Tuteur complet	Nb. accès limité	Info limitée	Tuteur complet / nb. accès limité	Tuteur complet / info limitée	Nb. accès limité / info limitée
Nombre d'accès au tuteur	28 (20)	7,3 (3)	35 (23)	X^2=43 p<0,01%	X^2=3,4 p=6,5%	X^2=45 p<0,01%
Performance	0,29 (0,2)	0,23 (0,1)	0,19 (0,1)	NS	X^2=9,1 p=0,3%	X^2=7,6 p=0,6%
Gain d'apprentissage	2,3 (2)	2,8 (2)	2,0 (2)	NS	NS	X^2=2,7 p=9,7%

Tableau 11. Nombre d'accès au tuteur, réussite et gain d'apprentissage dans Copex-chimie, pour les trois groupes étudiés et résultats des tests de Kruskal Wallis pour une comparaison deux à deux (NS signifie non significatif).

Le gain d'apprentissage est significativement positif (p<0.01%) comme le montre un test t de Welch pour les trois groupes de notre étude. La comparaison des groupes deux à deux indique que seuls les groupe info limitée et nb. accès limité ont une différence presque significative (X^2=2.7, p=9.7%) dans leurs apprentissages. Ce résultat va dans le sens de nos hypothèses indiquant que limiter les informations dans le guidage entrave l'apprentissage, tandis que limiter l'accès au tuteur promeut l'apprentissage. Cela est en accord avec les travaux cités précédemment (Gerard et al., 2016 ; Ryoo & Linn, 2016) indiquant qu'un guidage qui fait réfléchir est plus efficace pour les apprentissages qu'un guidage qui se contente de dire si la réponse est correcte. Bien que les résultats obtenus avec les trois groupes pour le gain d'apprentissage soient cohérents avec nos hypothèses, c.à.d. les étudiant du groupe nb. accès limité ont un gain d'apprentissage plus élevé que ceux du groupe tuteur complet et que des groupes tuteur complet et info limitée, nous n'observons pas de différence significative entre le groupe contrôle et les deux groupes expérimentaux. Ainsi cette étude ne permet pas de prouver que contraindre les étudiants dans le nombre d'accès au tuteur favorise l'apprentissage. Néanmoins, trouver un gain d'apprentissage significatif entre des groupes qui ont des conditions de rétroactions différentes n'est pas si facile (van der Kleij et al., 2012). Des travaux montrent qu'un guidage donné peut être plus efficace et conduire à un gain d'apprentissage plus élevé pour des étudiants qui ont un niveau faible de connaissances préalables par rapport à ceux qui ont des connaissances préalables importantes (van Riesen et al., 2018 ; Donnelly et al., 2015).

c- Résultats sur la stratégie des étudiants

Les résultats précédents signalent que contraindre le guidage en ne donnant qu'une information sur le nombre d'erreur n'est pas une stratégie gagnante ni pour la performance, ni pour l'apprentissage, car les étudiants du groupe Info limitée ont des résultats moins bons que tous les autres groupes. Par conséquent nous ne nous intéressons plus à ce groupe dans la suite de cette étude sur la stratégie des étudiants. Nous allons vérifier notre troisième hypothèse proposant que contraindre le nombre d'accès au tuteur devrait promouvoir l'apprentissage car cela devrait éviter les élèves d'utiliser le système de tuteur dans une stratégie de détournement du système (Baker et al., 2004).

Les indicateurs que nous avons utilisés pour caractériser cette stratégie de contournement du système sont les suivants.

- La *fréquence de modification*. Par rapport à Baker et al. (2008), nous considérons cet indicateur sur la durée totale de la session et non sur des petites étapes successives comme dans leurs travaux car nous n'avons pas l'équivalent dans Copex-chimie.
- La *fraction du tuteur vers l'information.* Nous pensons qu'un étudiant qui suit une stratégie de contournement du tuteur utilise plus fréquemment le tuteur pour obtenir une validation ou invalidation de ses dernières modifications du protocole, que pour obtenir des informations détaillées pour l'aider à corriger les erreurs faites. Tester différentes solutions peut permettre d'avoir un meilleur score sur leur protocole sans avoir à comprendre la nature des erreurs commises.

Les résultats pour ces indicateurs de stratégie sont donnés dans le Tableau 12.

	Moyenne (écart type)		Test de Kruskal Wallis
	Tuteur complet	Nb. accès limité	Tuteur complet / Nb. accès limité
Fréquence de modifications	1,25 (0,5)	1,01 (0,3)	X^2=4,4 p=3,6%
Fraction du tuteur vers l'information	0,82 (0,1)	0,89 (0,1)	X^2=7,3 p=0,7%

Tableau 12. Indicateurs pouvant caractériser le comportement de contournement du tuteur pour les groupes tuteur complet et nb. accès limité et résultats des tests de Kruskal Wallis.

Pour ces deux indicateurs, la différence entre les deux groupes est significative (p=3,6% et p=0,7%). Les étudiants du groupe tuteur complet modifient plus souvent leur protocole et sollicitent davantage le tuteur dans un but de validation que les étudiants du groupe nb. accès limité. Cela valide notre hypothèse. Limiter le nombre d'accès au tuteur semble une option efficace pour forcer les étudiants à réfléchir, l'objectif ultime étant de favoriser les apprentissages. Baker et al. (2008) ont montré que la stratégie de contournement du système peut être corrélée avec un apprentissage plus pauvre. Notre étude tend à donner le même résultat même si nous n'avons pas pu prouver le gain d'apprentissage de façon significative. Les travaux de Karavirta et al. (2006) indiquent que la limitation du nombre d'accès au tuteur n'est pas nécessaire pour tous les profils d'étudiants mais elle est d'autant plus profitable pour les étudiants ayant un profil de type « iterators », c.à.d. des étudiants qui utilisent la soumission de leur travail très souvent sans avoir nécessairement un score maximum à leurs exercices. Cette catégorie d'élèves a besoin d'encouragement pour réfléchir davantage avant de resoumettre une expérience, dans le but de changer leur façon d'apprendre et en fin de compte obtenir un gain d'apprentissage.

5.4.2. Études avec TitrAB

Un diagnostic par contraintes permet d'évaluer le protocole des étudiants. Si toutes les contraintes sont respectées, le système simule l'expérience, sinon il renvoie un message à l'élève lui donnant des informations sur les erreurs détectées. De même que dans Copex-chimie, le guidage se fait à la fois par rétroactions de résultats empiriques simulées et par rétroactions sur les erreurs des élèves, accompagnés d'instructions (cf. heuristique ou explication de Zacharia et al., 2015).

5.4.2.1. Présentation des guidages adaptatifs dans ce logiciel

Le diagnostic par contrainte

Dans l'exemple du choix de la verrerie de prélèvement (voir le Tableau 5), deux contraintes sont testées, l'une sur le type G_P (cela correspond à T_{C3}, Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M, voir le Tableau 4) et l'autre sur le volume de la verrerie V_P (cf T_{C4}) uniquement si le type est le matériel adéquat, c'est à dire la pipette jaugée. La contrainte sur le type G_P est une contrainte de satisfaction simple, la dimension validité étant assurée par le fait qu'un champ est réservé à la verrerie de prélèvement, et la contrainte se limite alors à vérifier que le champ a bien été renseigné. C'est le cas pour une majorité des contraintes implémentées actuellement, dans TitrAB. Néanmoins, la contrainte de

validité a été implémentée dans quelques cas comme celui du choix du volume V_P de la verrerie de prélèvement (T_{C4}) qui n'est pertinent que dans le cas d'une pipette jaugée. Si la contrainte de validité est respectée, alors la contrainte de satisfaction est mise en œuvre et vérifie que $V_P = V_M$ (pour des questions de précision, car utiliser plusieurs fois la même pipette conduit à une incertitude plus élevée sur la mesure qu'utiliser une seule fois une pipette de volume plus grand).

Décision didactique pour la rétroaction.

Dans l'état actuel du logiciel, le système de décision didactique est très basique. Il permet de déterminer les rétroactions, accompagnées d'une explication, renvoyées à l'élève lorsque des contraintes ne sont pas respectées, selon les deux règles de décision suivantes.

- A chaque contrainte correspond une rétroaction sous forme de message qui localise dans le protocole le Tm qui contient l'erreur et apporte, si l'enseignant le décide, des informations pour la corriger (il s'agit d'une explication à un niveau technologique ou technique selon les cas, sans que nous ayons explicité le choix de l'une ou l'autre des formulations lors de la conception du logiciel).
- A chaque soumission du protocole par l'élève, est renvoyé le message d'erreur correspondant à la contrainte de plus haute priorité. Ce point sera discuté dans la partie prospective de recherche, avec les améliorations de TitrAB proposées.

T_C	**Contrainte de validité**	**Contrainte de satisfaction**	**Rétroaction (localisation de l'erreur)**	**Explication**
T_{C3}	Aucune	G_P = "pipette jaugée"	Le matériel utilisé pour le prélèvement d'une dilution n'est pas adapté.	Pour le prélèvement d'une dilution, vous devez utiliser une verrerie jaugée qui permet de délivrer un volume précis de solution. *(niveau technique)*
T_{C4}	Contrainte satisfaite : G_P = "pipette jaugée"	$V_P = V_M$ avec V_M volume de la solution à prélever	Le volume de votre prélèvement de dilution ne correspond pas au matériel utilisé.	Une pipette jaugée délivre le volume correspondant à son volume total. *(niveau technologique)*

Tableau 13. Contraintes de validité et satisfactions pour T_{C3} et T_{C4} ainsi que les guidages donnés par TitrAB à l'élève.

Le Tableau 13 indique pour T_{C3} et T_{C4} les contraintes mises en œuvre et les guidages associés.

Ce système de décision didactique n'est pas satisfaisant pour différentes raisons.

- Il y a une correspondance entre les contraintes implémentées et la praxéologie de référence, cependant les praxéologies personnelles ne sont pas exploitées. Ainsi une contrainte peut correspondre à plusieurs techniques et technologies personnelles. Le message renvoyé à l'élève est identique, quelle que soit sa technique personnelle (voir l'exemple du Tableau 6).
- L'explication fournie manque de rigueur : elle se fait à un niveau technique ou technologique, alors que le caractère objectif d'apprentissage n'est pas explicité (comme nous l'avons décrit pour le logiciel Copex-chimie, voir le Tableau 8).
- L'analyse des traces d'utilisation des élèves montre que les messages renvoyés à l'élève ne constituent pas toujours une aide. Ainsi, si la rétroaction ne permet pas à l'élève de comprendre son erreur, il peut faire plusieurs tentatives de correction sans succès en recevant toujours le même message d'erreur qu'il ne comprend pas.

Comme dans Copex-chimie, il s'agit d'un guidage adaptatif qui ne peut être considéré comme un étayage car le désétayage n'est pas pris en charge.

La partie suivante présente l'évaluation que nous avons réalisée pour caractériser des comportements d'étudiants utilisant TitrAB.

5.4.2.2. Évaluation des comportements d'étudiants à partir des traces d'activité du logiciel TitrAB

Le titrage acide-base est une situation pédagogique courante en chimie. Beaucoup d'études se sont focalisées sur les stratégies employées par les élèves lorsqu'ils effectuent des calculs pour exploiter le résultat d'un titrage et déterminer la concentration de la solution à titrer (Anamuah-Mensah, 1986 ; Ouertatani & Dumon, 2008). En revanche, dans le cas des titrages, peu de travaux se sont intéressés à la conception d'expérience, étape en amont du traitement des données. Dans une étude de Bataille et al. (2010), des étudiants de première année post-bac sont amenés à concevoir des expériences, faire des choix de réactions, volumes et concentrations. Les auteurs indiquent que les étudiants ont rencontré des difficultés quand ils ont dû faire ces choix. « Habituellement tout est connu (…). Une liberté totale dans le choix du matériel a déstabilisé beaucoup d'étudiants ». Par exemple, la résolution du problème nécessitait de faire un calcul préalable à la préparation de solutions : « C'est une fois confrontés à ces exercices très concrets que les étudiants s'aperçoivent que de simples calculs de dilution ne sont pas forcément assimilés » (Bataille et al., 2010). Par ailleurs, Widarti et al. (2017) ont identifié des difficultés de la part d'étudiants dans le choix du matériel et le rinçage associé, lors de situations de titrage.

Nous avons déjà caractérisé les difficultés rencontrées par des élèves pour élaborer un protocole expérimental de titrage (Berthet et al., 2015) et proposé des guidages pour les aider dans leur tâche d'Ham et al., 2019). Une des difficultés majeures pour les étudiants est de faire un calcul préalable afin de déterminer la quantité de matière adaptée de solution à titrer, et éventuellement de faire une dilution. Il est nécessaire de faire un calcul par anticipation : il faut prendre en compte le matériel disponible tout en effectuant un raisonnement à l'aide de la valeur approximative de la concentration de la solution titrée.

Malgré les rétroactions fournies, beaucoup d'étudiants ne parviennent pas à résoudre les exercices proposés dans TitrAB. Nous avons mené une étude pour comprendre pourquoi ces étudiants ne réussissent pas. Par exemple, 203 étudiants ont réussi l'exercice 1 sur 380 étudiants qui ont fait cet exercice (résultat issu de l'étude présentée dans la méthode décrite ci-après). A partir des traces des étudiants, nous avons analysé l'activité des étudiants sur une fenêtre temporelle choisie. Cela est différent du diagnostic par contraintes qui analyse l'état du protocole à un instant donné. Ce nouveau diagnostic doit pouvoir permettre d'obtenir des informations sur les comportements des utilisateurs dans l'objectif de détecter les difficultés des étudiants vis à vis de concepts de chimie.

A partir des études précédentes, nous avons anticipé trois comportements que nous souhaitons rechercher dans les traces : (i) modifier un protocole sans réussir à obtenir une courbe exploitable, (ii) ne pas proposer une concentration après avoir obtenu une valeur de Veq et (iii) ne pas prendre en compte la dilution du titrant ou du titré pour le calcul de la concentration de la solution titrée.

a- Méthode expérimentale

Le corpus de données est constitué de 409 étudiants de licence 1ère année qui ont utilisé TitrAB en 2017 dans un enseignement de méthodes expérimentales qui inclut une séquence sur les titrages acide-base. Les étudiants doivent faire individuellement des exercices sur TitrAB hors de la classe. Chaque enseignant d'un groupe de travaux dirigés (TD) a fait au préalable une démonstration du logiciel en classe. Les étudiants doivent faire trois exercices de difficulté croissante (nommés ici exercices 1, 2 et 3).

Nous avons utilisé les traces informatiques des actions effectuées par les étudiants sur TitrAB enrichies par les diagnostics automatiques. Les actions analysées sont : soumettre une expérience au simulateur

ou proposer une valeur de concentration pour la solution titrée. Une trace est marquée temporellement et contient les valeurs des paramètres de l'action, choisis par l'étudiant. Elle est enrichie par les éléments de diagnostic automatique effectués par le système sur cette action : le nombre et la nature des erreurs effectuées par l'étudiant et la rétroaction faite à l'étudiant (messages, tracé d'une courbe, Veq). L'analyse automatique actuelle ne concerne que l'action que vient d'effectuer l'étudiant, et donc ne tient pas compte des actions passées de l'étudiant. L'exploitation des traces présentée ici vise à prendre en compte l'historique des actions d'un étudiant.

Les traces informatiques ont subi un cycle de traitement de contrôle, nettoyage, sélection et agrégation (voir la méthode présentée par Mandran et al. (2014)). Nous avons réalisé ensuite un codage de certaines actions des étudiants, en considérant le niveau de réussite de l'action : la soumission d'un protocole est codée E si elle est infructueuse, T si elle produit un tracé de courbe inexploitable, V si elle produit une courbe exploitable et ainsi donne accès à une valeur de volume équivalent. La soumission d'une valeur de concentration est codée c si elle est erronée et C sinon. Le chemin de résolution d'un exercice par un étudiant est ensuite représenté très simplement par la succession temporelle de ces codes d'actions. Ces séquences sont de longueur très variable, entre 1 et 76 actions pour un exercice. Une séquence permet donc d'interpréter, dans une certaine mesure, le cheminement de résolution d'un étudiant. Voici quelques séquences données à titre d'exemple pour comprendre le principe. La première séquenec (VC) correspond à une technique adéquate, la deuxième (VcCEEET) correspond à une technique correcte, mais adaptée de par l'utilisation de l'EIAH. La troisième séquence proposée correspond à une technique inadéquate pour répondre au problème.

- La séquence d'actions VC conduit de façon optimale à la réussite. L'étudiant a soumis une expérience qui produit une courbe exploitable et une valeur de Veq (V) ; l'étudiant a ensuite proposé directement la bonne concentration (C).
- La séquence VcCEEET est une adaptation de la technique correcte (VC) de résolution de l'exercice. La première soumission du protocole est fructueuse (V) suivi d'une soumission infructueuse puis fructueuse de concentration (cC). Le problème est donc résolu à ce stade de son travail. Néanmoins, l'étudiant continue par une exploration de l'EIAH avec d'autres actions (EEET), ce qui ne relève pas de difficultés mais illustre une stratégie d'exploration. Dans ce dernier exemple, le cheminement VcC n'est pas problématique car l'étudiant est immédiatement capable de corriger son erreur. Un guidage supplémentaire semble donc inutile.
- Par contre un cheminement du type VccccVcccEETVccc traduit un étudiant en difficulté quant à la détermination de la concentration ; le repérage de ce comportement et l'identification de la nature de l'erreur pourraient permettre de fournir un guidage adapté.

Nous étudions les séquences de façon qualitative, pour repérer des comportements au cours du temps, que nous avions anticipés. Nous avons ensuite déterminé le nombre d'occurrence des comportements d'étudiants repérés.

b- Comportements identifiés

Le Tableau 14 résume les résultats pour les trois comportements anticipés, avec pour chacun la séquence d'actions recherchée dans les traces. Dans le tableau sont indiqués le nombre d'étudiants associés à chaque comportement et le nombre d'étudiants total qui pourraient avoir ce comportement. L'étude présentée ici est centrée sur deux des trois exercices réalisés : l'exercice 1 qui ne nécessite pas de dilution d'une des solutions utilisées (titrée ou titrante) et l'exercice 2 qui inclut une dilution. 380 étudiants ont travaillé sur l'exercice 1 et 324 étudiants sur l'exercice 2.

Comportements observés	Indicateurs recherchés dans la séquence d'actions correspondante	Nombre d'étudiants repérés / nombre total d'étudiants concernés (%)
A- Ne pas réussir à passer d'une courbe non exploitable à une courbe exploitable.	Présence de T, sans aucun V	Exercice 1 : 55 / 306* (18%) Exercice 2 : 66 / 298* (22%)
B- Ne pas proposer une concentration immédiatement après avoir obtenu une courbe exploitable.	Présence de V mais ni Vc ni VC	Exercice 1 : 37 / 251** (15%) Exercice 2 : 46 / 232** (20%)
C- Ne pas prendre en compte le facteur de dilution	V…c Avec des valeurs de concentrations correctes, au facteur de dilution près.	Exercice 2 : 74 / 211*** (35%) (pas de dilution dans l'exercice 1)

Tableau 14. Comportements d'étudiants utilisant le logiciel TitrAB.
Les points de suspension indiquent la possibilité d'une séquence d'actions.
*Nombre d'étudiants qui obtiennent une courbe (T et/ou V) dans l'exercice concerné.
**Nombre d'étudiants qui obtiennent une courbe exploitable (V) dans l'exercice concerné.
***Nombre d'étudiants obtenant une courbe exploitable (V) puis proposent une concentration (c ou C).

Chaque comportement est discuté en essayant de comprendre les éventuelles causes. L'objectif est de proposer un guidage, une modification du logiciel, pour remédier à ces comportements et aider les étudiants à progresser dans leurs apprentissages.

- ***Comportement A : ne pas réussir à modifier un protocole pour obtenir une courbe exploitable***

Des étudiants n'arrivent pas à modifier leur protocole avec succès pour passer d'une courbe non exploitable à une courbe permettant d'obtenir un Veq. La difficulté sous-jacente est de déterminer les quantités de matière mises en jeu dans le titrage. Elle est spécifique de la conception de cette expérience, en raison du calcul par anticipation nécessaire. Le protocole de l'exercice 1 est plus facile que celui de l'exercice 2 car il n'y a pas de dilution à effectuer, néanmoins 18% des étudiants présentent ce comportement. Ce nombre augmente un peu pour l'exercice 2 (22%) avec la complexité du protocole à écrire. Nous avons cherché à comprendre ce que font les étudiants ayant ce comportement. Pour cela, nous avons compté le nombre d'actions faites par chacun après avoir eu une courbe non exploitable. Par exemple, pour l'exercice 1, les étudiants font beaucoup d'actions : la médiane se situe à 5 actions avec 29/55 étudiants au-dessus de la médiane. Cela montre que des étudiants semblent perdus et font des tentatives infructueuses. Pour les accompagner dans ce raisonnement complexe, la courbe inexploitable est désormais accompagnée d'un texte : « La valeur du volume équivalent n'a pas été déterminée par le système. Pour minimiser les incertitudes, la valeur du volume équivalent doit être suffisamment grande : au minimum 8 mL pour une burette de 25 mL. Un peu d'aide ? ». L'aide conduit à des questions pour aider l'étudiant à interpréter sa courbe sans lui donner la réponse.

- ***Comportement B : ne pas proposer une concentration immédiatement après une courbe***

Des étudiants ont des difficultés à exploiter leur courbe de titrage pour donner une concentration exacte alors qu'ils ont obtenu un Veq entre 8 et 20 mL. Dans l'exercice 2, 46 étudiants (20%) ne proposent pas de concentration directement après avoir obtenu une valeur de Veq. Une analyse plus détaillée de leurs séquences d'action met en évidence deux profils : 21 étudiants ne proposent aucune concentration, tandis que 25 vont d'abord retourner sur leur protocole et le modifier avant de proposer une concentration. Si les premiers semblent ne pas savoir comment exploiter le Veq obtenu, il est difficile d'interpréter le deuxième profil : veulent ils explorer le modèle avant de proposer une concentration et

terminer leur exercice ? De nombreux travaux ont mis en évidence les difficultés d'élèves ou étudiants à comprendre le principe de point d'équivalence et les concepts de chimie sous-jacents (Sheppard, 2006 ; Supatmi et al., 2019). Il est nécessaire de mieux comprendre les raisons de ces comportements avec TitrAB pour pouvoir proposer une adaptation du logiciel. Nous pourrions ajouter une rétroaction vers un étudiant qui effectue plusieurs actions de soumission d'expérience après avoir obtenu un Veq au lieu de proposer une concentration. La difficulté est de distinguer le cas de l'étudiant perdu qui modifie son protocole, de celui qui retourne explorer les paramètres du protocole avant de terminer son exercice en proposant une concentration. Un travail plus approfondi est nécessaire en interrogeant par exemple des étudiants.

- ***Comportement C : ne pas prendre en compte le facteur de dilution***

Nous avons focalisé notre recherche sur l'exercice 2 qui comporte une dilution avec un facteur de dilution égal à 10. La séquence d'action permet de repérer qu'un étudiant rencontre une difficulté au niveau de la détermination de la concentration. Identifier que la difficulté provient du facteur de dilution nécessite d'introduire une information complémentaire sur la valeur de concentration proposée par l'étudiant. Parmi les étudiants qui ont obtenu une courbe exploitable et proposé une concentration, 74 (35%) ont donné une concentration dix fois plus faible que celle attendue, ce qui montre qu'ils ne prennent pas en compte le facteur de dilution. 39 ont corrigé immédiatement après le retour du logiciel indiquant une concentration erronée ; 16 ont donné la bonne concentration après une ou plusieurs tentatives infructueuses et 19 étudiants n'ont pas réussi à trouver la bonne concentration. Pour accompagner ces étudiants, nous avons ajouté un diagnostic permettant de vérifier que la concentration proposée était correcte au facteur de dilution près. Il est facile d'ajouter une rétroaction sur le facteur de dilution pour alerter les étudiants sur ce point : « Avez-vous pris en compte la dilution ? ». Cependant ce type de rétroaction ne prend pas en compte le facteur temporel. Ce guidage n'est pas utile pour les étudiants qui avaient réussi à corriger directement leur erreur (séquence VcC). C'est la prise en compte de la récurrence de l'erreur dans une séquence temporelle d'actions qui indique la présence d'une difficulté et le besoin d'un guidage complémentaire. La mise en place d'un tel guidage nécessite la détection automatique du comportement et du besoin en temps réel.

Dans la partie « Prospectives de recherche » seront discutées les améliorations de TitrAB envisagées et l'évaluation de l'impact des guidages proposés.

En conclusion de cette partie, la littérature montre qu'il existe une grande variété de travaux qui s'intéressent au guidage par un EIAH, dans une activité d'enseignement mettant l'élève au cœur du dispositif d'apprentissage. Les diversités de guidage sont grandes, sans qu'il y ait consensus sur les termes employés, notamment sur l'idée d'étayage dans les EIAH, qui n'inclut pas nécessairement un désétayage associé, ainsi que sur les intentions et formes de guidage. Beaucoup de nos recherches passées se sont déroulées autour de la question des guidages par un EIAH, de l'influence de ces guidages sur la réussite à une activité, sur les stratégies développées par les élèves et sur les réussites associées, à partir de l'utilisation de plusieurs EIAH. Ces préoccupations sont toujours très fortes dans nos travaux, c'est pourquoi la partie « prospectives » détaille des projets dans la continuité des recherches passées autour des guidages par un EIAH.

Chapitre 6 - Prospectives de recherche

Pour faire suite au bilan des recherches, cette partie « prospectives de recherche » développe deux axes qui correspondent à des travaux en cours, en lien avec le guidage de situations d'enseignement.

Le premier axe concerne **le guidage adaptatif**, dans le cadre d'une activité de conception expérimentale. Le but est d'améliorer la réussite des étudiants qui conçoivent une expérience, et au-delà les apprentissages associés. Ce travail s'appuie sur le logiciel TitrAB, avec une évolution du processus de décision didactique et pédagogique de cet EIAH pour la rétroaction, reposant sur une modélisation praxéologique. L'évolution porte d'une part sur le diagnostic du protocole de l'étudiant, et d'autre part sur le choix du guidage adaptatif, que ce soit en lien avec les erreurs des élèves (diagnostic épistémique) ou avec leur comportement dans l'utilisation de TitrAB (partie 6.1).

Le deuxième axe de recherche porte sur **l'utilisation de la plateforme LabNbook** dans une vision socioconstructiviste de l'apprentissage, selon deux directions.

- Du côté enseignants, nous souhaitons évaluer comment LabNbook peut soutenir les enseignants dans la mise en œuvre d'enseignements impliquant des démarches expérimentales, et quels sont les guidages proposés par les enseignants pour accompagner leurs étudiants dans ce type d'enseignement (partie 6.2).
- Du côté étudiants, nous avons comme projet la conception et l'évaluation de tableau de bords à usage des étudiants qui travaillent avec la plateforme LabNbook, afin de leur fournir des informations sur leur travail. Les indicateurs affichés dans le tableau de bord visent la facilitation de la régulation de leurs apprentissages individuels et du travail par groupe (partie 6.3).

6.1. Améliorer les décisions didactiques pour la rétroaction

Si nous nous plaçons dans le cas des systèmes de tuteurs intelligents (STI), TitrAB fait partie des STI qui reposent sur un domaine de connaissance mal défini (voir partie 5.1.2.). Seront décrits ci-après des éléments de trois des quatre parties qui composent un STI (Nkambou et al., 2010), le module expert, le modèle de l'étudiant, la stratégie de guidage mais nous ne parlerons pas de l'interface utilisateur dans la suite de ce mémoire.

Pour faire évoluer le processus de décision didactique et pédagogique de l'EIAH, nous nous sommes appuyés sur la modélisation praxéologique décrite dans le chapitre 4, illustrée ici dans le cadre du logiciel TitrAB. Les évolutions apportées à l'EIAH portent d'une part sur le diagnostic du protocole de l'étudiant et d'autre part sur le choix du guidage adaptatif. Ce travail a été réalisé récemment. Il nous reste à finaliser l'évaluation du dispositif de guidage.

Cette partie décrit donc les choix de conception du logiciel, sans développer l'implémentation informatique, et se termine par des premiers éléments sur l'évaluation du nouveau dispositif.

6.1.1. Évolutions du diagnostic en lien avec le modèle de connaissance

Wenger distingue dans le diagnostic, le niveau comportemental et le niveau épistémique (1987, cité dans Balacheff, 1992). Cette distinction repose sur l'absence ou la présence d'interprétation des comportements. Le diagnostic épistémique consiste alors en une interprétation des comportements, éventuellement reconstruits, de l'apprenant pour élaborer un modèle de ses connaissances.

Selon Balacheff (1992), le modèle comportemental est obtenu à partir de l'ensemble des évènements par un traitement qui consiste soit à ignorer des évènements qui ne seraient pas pertinents, soit à remplacer certaines séquences d'évènements par un descripteur de plus haut niveau déterminé par le langage de commande du système. En revanche, le modèle épistémique, aussi appelé « modèle de

l'apprenant » dans la littérature, est construit à partir du modèle comportemental. Il s'agit de la reconstruction, à partir des observables, du processus de résolution du problème ou la caractérisation de l'état cognitif de l'apprenant.

Dans TitrAB, le diagnostic par contrainte, décrit auparavant, produit la liste des erreurs apparaissant dans un protocole proposé par un étudiant à un instant donné. Il se rapproche d'un diagnostic comportemental tel que décrit précédemment.

Le diagnostic a évolué selon les orientations suivantes pour se rapprocher d'un diagnostic épistémique.

- Affiner le diagnostic en s'appuyant sur les praxéologies personnelles. Prendre en compte des techniques personnelles permet de produire de nouvelles contraintes. Par exemple, pour prélever une solution avec précision, la technique adaptée est celle qui utilise une pipette jaugée. Or il existe deux techniques alternatives erronées, rendues possibles par le matériel proposé : l'utilisation d'une fiole jaugée ou d'une éprouvette graduée à la place d'une pipette jaugée. Chacune de ces techniques correspond à une erreur qui peut s'expliquer par des technologies personnelles différentes. Le diagnostic par contrainte que nous avions proposé dans la première version permettait uniquement de vérifier si la pipette était utilisée, mais ne faisait pas la différence entre un étudiant qui utiliserait une fiole jaugée ou une éprouvette graduée. Nous avons commencé à prendre en compte les praxéologies personnelles en ajoutant deux nouvelles contraintes issues des praxéologies personnelles. Un exemple sera donné par la suite.
- Utiliser le modèle praxéologique pour identifier des erreurs similaires.
    - Cela est intéressant lorsque l'étudiant rencontre un type de tâche donné, à travers plusieurs tâches (exercices différents ou au sein d'un seul exercice), pour lesquelles l'étudiant va convoquer une technique personnelle. Il est alors pertinent de prendre en compte l'historique de l'étudiant dans les couples {erreur, message envoyé} pour moduler le message fourni à l'étudiant. Le modèle praxéologique permet ainsi d'identifier dans l'historique les couples pertinents à prendre en compte dans la décision, c'est à dire ceux qui portent sur le même type de tâches.
    - Dans cette situation, les types de tâches peuvent être exprimés à différents niveaux de généricité, c'est à dire soit au niveau du type de tâches associé aux erreurs, soit au niveau d'un type de tâches générique qui est un générateur de types de tâches. Par exemple, dans TitrAB, à plusieurs reprises, il est nécessaire de choisir une verrerie. Quatre erreurs ont été répertoriées qui s'apparentent au choix du type de verrerie. Les quatre types de tâches correspondant à ces erreurs peuvent être regroupés sous un type de tâches générique, selon la description faite dans le Tableau 15.

Types de tâches du plus générique au plus spécifique (de gauche à droite)		
T. Choisir un type de verrerie	T1. Choisir le type de verrerie à utiliser pour prélever un liquide	T1a. Choisir le type de verrerie pour prélever la prise d'essai
		T1b. Choisir le type de verrerie pour prélever la solution à diluer
		T1c. Choisir le type de verrerie pour ajouter du liquide afin d'immerger les électrodes
	T2. Choisir le type de verrerie à utiliser pour préparer une solution	T2a. Choisir dans quel type de verrerie faire une dilution

Tableau 15. Organisation de types de tâches.

Une autre façon de décrire cette organisation de types de tâches est de se référer au générateur de type de tâches T et ses variables V du modèle T4TEL :

T= Choisir un type de verrerie, V1= finalité d'utilisation de la verrerie ; V2 = type de solution

V1 permet de passer de T au sous type de tâches T1 (ou T2)

V2 permet de passer de T1 au sous type de tâches T1a (ou T1b ou T1c)

Cela permet de réfléchir à quel niveau de généricité, il est pertinent de faire le guidage, sachant que la technique de T1a et T1b sont les mêmes mais que la technique de T1c est différente.

Le diagnostic épistémique est basé sur les transitions entre deux états successifs d'une contrainte. Sur la base du diagnostic effectué, une rétroaction est transmise aux étudiants (voir parties suivantes sur la décision didactique et pédagogique), mais également des compétences sont calculées. Une compétence détermine si l'étudiant est capable de réaliser correctement un type de tâche. Un score de compétence est déterminé pour chaque type de tâches (je ne détaille pas ce calcul, n'ayant pas effectué ce travail de modélisation informatique). Dans l'interface des étudiants, la liste des compétences est proposée avec un affichage du score pour chacune d'elles.

6.1.2. Évolution de la décision didactique et pédagogique pour adapter le guidage

Dans l'évolution du logiciel, il n'y a plus un seul mode de guidage sous forme de rétroaction pour une contrainte donnée, mais une variété de messages est produite en fonction des différents cas de diagnostics énumérés précédemment. La décision d'émettre un message donné repose sur un diagnostic plus élaboré mais aussi sur des règles de décision enrichies.

La stratégie de décision didactique s'appuie sur les éléments suivants.

- La praxéologie institutionnelle qui décrit la praxis et le logos associés aux types de tâches de conception.
- La généricité d'une tâche en faisant éventuellement appel à un type de tâches générique.
- Les praxéologies personnelles.
- L'historique des précédents messages reçus par l'étudiant.
- Une pondération par rapport aux enjeux d'apprentissage du type de tâches contenant l'erreur. Nous proposons trois niveaux (0, 1, 2) définis en fonction de la nouveauté du type de tâche et sa complexité dans l'apprentissage. (Cela est détaillé peu après).

Le processus de décision didactique a alors la charge de choisir quelles informations apporter dans le message donné à l'étudiant. Cette rétroaction relève des niveaux suivants de la praxéologie.

- Tâche et paramètre de la tâche concernés par l'erreur.
- Indication d'éléments technologiques et théoriques associés à la conception.
- Indications sur la technique de conception à mettre en œuvre.
- Correction de l'erreur en indiquant la technique attendue.

Nous venons d'évoquer les paramètres d'entrée à prendre en compte dans le processus de décision didactique et pédagogique, ainsi que les différentes sorties (messages) possibles, la suite du travail a consisté à mettre en place un algorithme de décision les reliant.

6.1.2.1. Les principes de décision dans TitrAB

Cet algorithme ne prend pas forcément en compte tous les paramètres d'entrée et ne nécessite pas que les messages soient disponibles à tous les niveaux de la praxéologie. Je décris les principes que nous avons choisis pour définir le processus de décision didactique et pédagogique dans TitrAB, qui mène à une rétroaction.

- Si le type de tâches n'est pas considéré comme objectif d'apprentissage (niveau 0), le système de décision didactique et pédagogique est configuré pour envoyer un message permettant de localiser

dans le protocole le paramètre de la tâche qui contient l'erreur et ensuite, si l'erreur n'est pas corrigée, de donner des indications directement au niveau technique, sans passer par les niveaux théorique et technologique. Nous faisons le choix de laisser l'étudiant réfléchir à la technique adaptée et ne pas lui donner directement la réponse attendue.

- Si le type de tâches est considéré comme objectif d'apprentissage (niveau 1 ou 2 selon l'importance), alors le système de décision commence par spécifier la tâche qui comprend une erreur et orienter l'étudiant vers des éléments théoriques (lien vers un cours associé). Si cela ne suffit pas à l'étudiant pour corriger l'erreur, la rétroaction suivante est au niveau technologique pour le faire réfléchir sur la connaissance associée, puis si nécessaire des informations au niveau technique et en dernier recours la technique attendue sont données.
- Si dans notre modélisation praxéologique, un type de tâches est associé à un type de tâches plus générique, alors la décision didactique est enrichie pour intégrer ces différents niveaux de type de tâches et les messages associés. Je donnerai un exemple dans le Tableau 17.

6.1.2.2. Prise en compte des praxéologies personnelles

Il s'agit d'un élément complexe dans la décision didactique sur lequel nous devons encore avancer dans la réflexion. La prise en compte des praxéologies personnelles permet de faire à l'étudiant une rétroaction spécifique par rapport à une erreur, qui illustre une technique (et technologie) alternative de l'étudiant.

Deux contraintes peuvent être liées au même type de tâches mais proposer des rétroactions différentes. Par exemple dans le Tableau 16, la première ligne correspond au cas général, où la contrainte vérifie le respect de la règle : est-ce que le liquide ajouté dans le bécher pour faire tremper les électrodes après la prise d'essai est l'eau distillée ? La deuxième ligne du tableau illustre une erreur en particulier dans le non-respect de la contrainte qui est le choix de la solution titrée à la place de l'eau distillée. Nous interprétons cette erreur par le recours de l'étudiant à une technique et/ou une technologie spécifique. Cela reste une interprétation du chercheur et nous faisons le pari que l'étudiant a bien mobilisé la praxéologie personnelle que nous avons associée à son erreur, afin qu'il comprenne les rétroactions renvoyées par le système. Le risque est que nous sur-interprétions les données et que l'étudiant ait appliqué un autre raisonnement.

Type de tâches	**Contrainte**	**Rétroaction au niveau technologique**	**Rétroaction au niveau technique**	
			Informations	**Valeur attendue du paramètre**
Choisir la nature du liquide ajouté pour immerger les électrodes	Le liquide ajouté dans le bécher pour immerger les électrodes doit être le solvant de la solution titrée : eau distillée	Le liquide ajouté ne doit pas contenir d'espèce chimique réagissant avec le réactif titré ou titrant.	Le liquide ajouté doit être identique au solvant de la solution titrée.	Ajoutez de l'eau distillée.
	Le liquide ajouté dans le bécher pour faire tremper les électrodes ne doit pas être la solution titrée -> PRAXEOLOGIE PERSONNELLE	Le volume de la prise d'essai doit être connu avec une précision maximale.	Vous ne devez pas prélever votre prise d'essai en plusieurs fois.	Pour immerger les électrodes du pH-mètre, vous devez ajouter dans le bécher de l'eau distillée.

Tableau 16. Illustration d'une praxéologie personnelle dans TitrAB, avec les rétroactions possibles à différents niveaux de la praxéologie

6.1.2.3. Ordre des contraintes dans les rétroactions envoyées aux étudiants

Dans TitrAB, afin de ne pas submerger l'étudiant par trop d'informations, nous avons fait le choix de ne pas envoyer aux étudiants un retour sur toutes les erreurs présentes dans leur protocole, au moment où ils demandent une évaluation du tuteur artificiel. Le logiciel fait une rétroaction sur une seule erreur mais indique le nombre total d'erreurs présentes. La question est de savoir quelle est l'erreur sur laquelle une rétroaction sera renvoyée. Pour cela, nous avons défini un ordre de priorité en ordonnant les contraintes selon les principes suivants.

- L'ordre des tâches de manipulation auxquelles les contraintes et types de tâches de conception (Tc) sont rattachés (voir partie 4.5). Cet ordre correspond au déroulement de la manipulation : préparer la burette et le bécher de titrage (d'abord le choix de la solution, puis celui du matériel), puis faire une dilution de l'une des solutions titrante ou titrée si nécessaire (solution, puis matériel) et enfin finir de préparer le bécher de titrage avec l'ajout éventuel d'une solution pour faire tremper les électrodes (solution, puis matériel).
- L'ordre des Tc, tel qu'un Tc ne modifie pas des paramètres ayant été fixés par les précédents Tc. Ce principe général a guidé dans la définition des priorités mais il est dans quelques cas difficile à prendre en compte lorsqu'un paramètre intervient dans plusieurs Tc. Dans ce cas, l'ordre importe peu et nous avons choisi celui qui semblait le plus pertinent pédagogiquement.
- Lorsque pour un Tc, il existe une praxéologie personnelle (cf. le Tableau 16), nous avons choisi dans ce cas de mettre en priorité la contrainte liée à la praxéologie personnelle.

6.1.2.4. Illustration de la décision didactique et pédagogique

Le Tableau 17 montre des exemples permettant d'illustrer la décision didactique et pédagogique dans TitrAB. Cela correspond à un travail effectué dans le cadre du master d'Agnès Berthet (2020). Nous avons associé toutes les erreurs diagnostiquées par contraintes dans le logiciel TitrAB à un type de tâches ; il existe dans le logiciel 31 contraintes qui, si elles ne sont pas respectées, correspondent à une erreur. Une sélection de trois contraintes permet d'illustrer ce propos.

- La première colonne expose des exemples de types de tâches. Pour un type de tâche donné, l'étudiant doit spécifier un paramètre de la tâche.
- La contrainte, donnée dans la deuxième colonne, permet de vérifier que la valeur du paramètre de la tâche choisie par l'étudiant correspond à la valeur attendue par l'institution. Ainsi, il y a erreur lorsque la contrainte n'est pas respectée (la valeur de l'étudiant n'est pas celle attendue).
- La troisième colonne spécifie le niveau (0 à 2) d'enjeu d'apprentissage pour chaque type de tâche. Les trois premières lignes du tableau montrent un exemple avec les trois valeurs possibles pour les objectifs d'apprentissage.
    - La différence entre les niveaux 1 et 2 d'enjeu d'apprentissage est faible. Pour le niveau 2, les rétroactions au niveau technologique et informations sur la technique sont proposées deux fois consécutives, pour allonger le chemin jusqu'à la réponse.
- Les colonnes suivantes donnent les messages de rétroactions aux différents niveaux de la praxéologie : tâche, technologie, technique.
    - Pour le niveau 0 (3ème exemple), le tableau indique un message correspondant au niveau technologique, même s'il n'est pas utilisé par le système de décision tel que décrit ici. Cela permet au système de décision de fonctionner correctement en cas de changement de niveau pour l'objectif d'apprentissage.
- La dernière ligne du tableau correspond à un exemple de type de tâches générique « Choisir le type de verrerie à utiliser pour prélever un liquide » et les rétroactions associées. Ce type de tâche est associé aux deux types de tâches spécifiques reportées dans le Tableau 17 : « Choisir le type de verrerie pour prélever la prise d'essai » et « Choisir le type de verrerie pour ajouter du liquide afin

d'immerger les électrodes ». Si l'une ou l'autre de ces erreurs apparaît dans le protocole d'un étudiant (contraintes non respectées), le système de décision didactique et pédagogique ajoute des rétroactions correspondant au type de tâches générique. Après avoir localisé l'erreur et orienté vers le cours, TitrAB fournit un message correspondant aux niveaux technologique et technique du type de tâches générique et des types de tâches spécifiques, selon un ordre spécifique qui fait du sens pédagogiquement (d'abord les niveaux technologiques puis techniques). Les messages correspondant au type de tâches générique devraient pousser l'étudiant à réfléchir de façon globale à la question de précision. Nous devons également décider comment prendre en compte l'historique de tous les types de tâches relevant d'un même type de tâches générique dans la décision didactique, afin d'exploiter au mieux les types de tâches génériques dans la décision didactique.

6.1.3. Évaluation du processus de décision didactique et pédagogique

Une fois le processus implémenté dans TitrAB, l'étape suivante consiste à évaluer comment les étudiants se saisissent des messages d'erreurs et si cela les fait progresser dans leurs apprentissages.

Cette recherche vise à évaluer l'effet de différentes conditions de guidage sur la réussite aux exercices et sur les comportements mis en œuvre à travers l'analyse des traces informatiques d'activité des étudiants, ainsi que sur les apprentissages. Les réflexions qui ont guidé la mise en place de cette évaluation du processus de décision sont décrites. L'expérimentation a été réalisée récemment mais les données n'ont pas encore été analysées.

6.1.3.1. Réflexion sur l'évaluation de l'apprentissage

Comme déjà présenté dans une section précédente, des travaux montrent qu'un guidage donné peut être plus efficace et conduire à un gain d'apprentissage plus élevé pour des élèves qui ont un niveau faible de connaissances préalables par rapport à ceux qui ont des connaissances préalables importantes (van Riesen et al., 2018) ; (Donnelly et al., 2015). De nombreux autres travaux sont référencés par van Riesen et al., 2018.

Il est important de faire cette distinction car dans ces études, il n'existe en général pas de différences significatives selon les conditions de guidage si l'on considère tous les élèves. En revanche, le fait de trier les élèves en fonction de leur niveau de connaissance préalable, permet de mettre en évidence des différences significatives de gain d'apprentissage. Néanmoins, il existe une limite car l'étude de van Riesen et al. (2018) montre qu'il faut un niveau minimum de connaissance pour que les élèves tirent profit du guidage. Cela s'explique probablement par le fait que le problème à résoudre se trouve en dehors de la zone proximale de développement de ces élèves. Une étude de Roll et al. (2014) indique que dans certaines situations, des élèves avec un faible niveau de connaissances préalables réussissent mieux lorsqu'ils adoptent au préalable un comportement de type essai-erreur dans l'environnement de travail, qui leur permet ensuite de profiter davantage du guidage proposé et d'en tirer bénéfice.

L'évaluation d'un apprentissage est toujours une tâche complexe en didactique des sciences. Dans la littérature, la méthode la plus communément décrite est l'évaluation de l'apprentissage lors de la mise en place d'un plan expérimental, l'apprentissage étant estimé par une différence de score entre un post-test et un pré-test de connaissances, ces deux tests étant identiques. Parfois, un post-test décalé dans le temps est administré mais cela est présent dans peu d'étude ; un exemple est cependant proposé par Ryoo et Linn (2016).

Néanmoins, la mise en œuvre de pré et post-tests n'est pas toujours facile avec de grands effectifs, en situation d'enseignement écologique. Une alternative intéressante a été proposée par Etkina et al. (2010) dans une situation d'enseignement expérimental à l'université. Deux groupes d'étudiants effectuent des travaux pratiques de physique pendant un semestre, l'un d'eux doit concevoir des expériences, guidés par des questions de réflexion, tandis que l'autre groupe d'étudiants suit des protocoles donnés par leur

enseignant. L'acquisition de compétences scientifiques a été évaluée lors d'une autre situation d'enseignement lorsqu'il est demandé à la fin de la séquence aux deux groupes de concevoir une expérience sur un contenu non familier, sans aucun guidage (l'un en physique, l'autre en biologie). Les étudiants qui avaient conçu leurs expériences auparavant ont produit de meilleurs compte-rendu de laboratoire, montrant l'acquisition de compétences scientifiques et la capacité de les transférer.

6.1.3.2. Mise en place d'une expérimentation

La question de recherche qui a guidé cette expérimentation était de vérifier si le nouveau processus de décision didactique et pédagogique permettait aux étudiants de réussir les exercices de titrage et favorisait les apprentissages associés.

Nous avons fait les hypothèses de recherche suivantes :

- Les rétroactions adaptatives améliorent la persévérance des étudiants et les apprentissages.
- Cet effet est probablement visible uniquement sur les étudiants initialement les plus faibles.

La méthode mise en œuvre s'apparente à un plan expérimental, avec quelques ajustements.

Le groupe expérimental correspond à une utilisation de TitrAB avec des rétroactions adaptatives, ce qui implique l'accès au processus complet de décision didactique et pédagogique. Les étudiants ont accès à tous les niveaux de messages, du niveau tâche pour localiser l'erreur, au niveau technique attendue avec la valeur du paramètre (qui est la réponse), en passant par les niveaux théoriques, technologiques et techniques.

Le groupe contrôle possède un guidage fixe qui indique uniquement la localisation de l'erreur, suivi des niveaux théoriques et technologiques sans aller plus loin. Ce choix de groupe contrôle nous paraît être le meilleur pour ne pas pénaliser des étudiants dans leurs apprentissages. L'hypothèse est que ces niveaux seraient suffisants pour que les étudiants avec un niveau de connaissance préalable élevé réalisent la tâche, mais risqueraient de ne pas être suffisants pour les étudiants avec un niveau préalable de connaissance faible, qui pourraient alors abandonner le travail demandé.

Environ 400 étudiants de licence 1 ont utilisé TitrAB en travail personnel lors d'une séquence d'enseignement. Les étudiants ont été répartis entre les deux groupes de façon aléatoire.

La tâche des étudiants a consisté à réaliser deux exercices dans le logiciel TitrAB avec l'une des deux conditions de guidage. Les étudiants ont ensuite fait un troisième exercice sans aucun guidage.

- Nous allons tester s'il y a une différence dans la persévérance à la tâche dans la réalisation des trois exercices demandés, entre les deux groupes ayant des conditions de guidage différentes. Les indicateurs de persévérance sont le temps de travail et le nombre d'abandon (exercices non faits ou partiellement faits).
- L'apprentissage sera évalué par la réussite au troisième exercice.
- Afin de vérifier la parité entre les deux groupes d'étudiants vis-à-vis de leurs connaissances préalables, les étudiants ont dû répondre à un pré-test en ligne, obligatoire avant de commencer les exercices. Celui-ci servira également à voir s'il y a une différence d'apprentissage selon les profils initiaux des étudiants.

Ces expérimentations étant achevées, notre travail à court terme va consister à analyser les données récoltées. Pour cela, je vais me former à l'utilisation de SQL pour exploiter la base de données des traces. Ensuite, nous avons plusieurs idées pour faire évoluer le logiciel TitrAB. Une possibilité est d'aller plus loin sur le diagnostic lié à l'utilisation des rétroactions par les étudiants. Nous avons initié cette réflexion lors d'un travail de master. Une piste de travail à plus long terme est de travailler sur la génération automatique d'exercices, pour laquelle TitrAB se prête bien. Une collaboration avec Nathalie Guin et Marie Lefevre du LIRIS est en cours d'étude.

Type de tâches	Contrainte	Objectif apprentissage	Rétroactions			
			Au niveau de la tâche et de son paramètre concerné	Au niveau technologique	Au niveau technique	
					Informations	Valeur attendue du paramètre
Choisir le type de verrerie pour prélever la prise d'essai	La verrerie pour la prise d'essai doit être une pipette jaugée	2 (objectif d'apprentissage important)	Erreur au niveau de la verrerie utilisée pour la prise d'essai.	La quantité de matière contenue dans la prise d'essai doit être connue avec précision.	La solution titrée doit être prélevée avec une verrerie de précision.	La solution titrée doit être prélevée avec une pipette jaugée.
Choisir le type de verrerie pour ajouter du liquide afin immerger les électrodes	Le matériel pour l'ajout de solvant dans le bécher doit être une éprouvette graduée	1 (objectif d'apprentissage)	Erreur au niveau du matériel utilisé pour ajouter le liquide en plus de la prise d'essai.	Le volume de liquide ajouté n'a pas besoin d'être connu avec précision : il n'intervient pas dans le calcul de la concentration de la solution titrée.	Pour ajouter le liquide il n'est pas utile d'utiliser une verrerie de précision.	Pour ajouter le liquide, utilisez une éprouvette graduée.
Ajuster le volume minimum de solution dans le récipient de titrage	Le volume de solution contenue dans le bécher doit être suffisant pour que les électrodes plongent	0 (pas objectif d'apprentissage)	Erreur au niveau du volume de liquide contenu dans le bécher.	Pour mesurer le pH, les électrodes du pH-mètre doivent être complètement immergées.	Pour immerger les électrodes du pH-mètre, vous devez remplir le bécher au moins au tiers.	Pour immerger les électrodes du pH-mètre, vous devez ajouter au moins « x mL ».
Type de tâches générique : Choisir le type de verrerie à utiliser pour prélever un liquide	*Pas de contrainte car niveau générique, donc plusieurs erreurs possibles*			Lorsque vous prélevez une solution, vous devez vous demander si vous avez besoin de connaître avec précision la quantité de matière prélevée.	Pour prélever un liquide, utilisez de la verrerie de précision si vous avez besoin de connaître exactement le volume et/ou la quantité de matière.	

Tableau 17. Exemples d'erreurs associées à un type de tâches, les erreurs étant diagnostiquées par contrainte dans TitrAB et pour chacune, les éléments utilisés pour la rétroaction sont détaillés.

6.2. LabNbook et la démarche expérimentale

Dans le cadre des projets IDEX-Formations des universités de Grenoble et du projet Guidance en partenariat avec l'institut français de l'éducation (ifé) et des enseignants de lycées, nous avons travaillé avec des enseignants de science qui ont utilisé la plateforme LabNbook dans leurs enseignements pendant plusieurs années. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux activités d'enseignements proposées dans LabNbook (appelées « missions ») afin d'identifier en quoi les situations d'enseignement mises en œuvre permettent de faire travailler des étudiants sur la démarche expérimentale, et le cas échéant comment les enseignants ont guidé leurs étudiants.

Le fait que nous ayons pu suivre les enseignements et enseignants sur plusieurs années nous permettra d'avoir une vision de l'évolution des pédagogies mises en œuvre.

Il s'agit d'un travail en cours qui concerne l'évaluation d'usages de la plateforme LabNbook par des enseignants. Les données ont été récoltées et sont en cours de traitement et d'analyse.

6.2.1. Questions de recherche

Nous cherchons à répondre aux questions de recherche suivantes, en lien avec les centres d'intérêts développés dans les chapitres précédents.

QR1. Quels types de tâches de la démarche expérimentale sont confiées aux étudiants et dans quelle mesure ?

Nous aimerions savoir si, dans les enseignements étudiés, les enseignants font travailler leurs étudiants sur une partie ou sur toute la démarche expérimentale (voir les différentes étapes de cette démarche dans la Figure 2). Dans le cadre d'un apprentissage de la démarche, l'enseignant peut prendre en charge certaines étapes de la démarche. Cela peut correspondre à une volonté d'aider des étudiants, ou bien c'est adapté à une situation pédagogique spécifique. Par exemple, pour un problème technique à résoudre, l'enseignant fournira le problème aux étudiants (e.g. déterminer la concentration d'une solution par un dosage).

Au sein d'une unité d'enseignement, existe t'il plusieurs missions dans lesquelles les étudiants sont amenés à pratiquer une démarche expérimentale ? Dans ce cas, constituent-elles un ensemble avec une progression/évolution quant à la pratique d'une démarche expérimentale ?

QR2. Quels éléments de guidage sont apportés par l'enseignant, par l'intermédiaire de LabNbook, lorsqu'une tâche est en partie, ou totalement à la charge des étudiants ? Plusieurs idées guident pour répondre à cette question de recherche.

- Au cours d'un apprentissage de la démarche, les enseignants vont aider les étudiants de diverses façons pour qu'ils mènent à bien cette tâche. Le guidage peut se faire au niveau de la démarche globale ou au niveau des types de tâches,
    - par des consignes (comprendre dans le détail ce qu'il faut faire, au niveau de l'ensemble de la démarche ou d'une étape),
    - par des questions ou des informations apportées par les enseignants,
    - par la structuration de la démarche avec des tâches à réaliser (à travers des parties de rapport et/ou des labdocs déjà proposés par l'enseignant).
- Quelle est utilisation des outils Copex et Fitex dans le guidage de la démarche ?

QR3. Comment évoluent les pédagogies mises en œuvre (étapes de la démarche et guidage) entre les différentes années d'utilisation de la plateforme ?

Un suivi longitudinal sur plusieurs années permet de caractériser l'évolution des enseignements mis en place dans LabNbook. Une question importante est de savoir si, au fil des cycles d'enseignement, la plateforme LabNbook amène les enseignants à transformer leur pédagogie, grâce à diverses impulsions

telles que la découverte d'outils qui favorisent des activités (e.g., l'outil Copex facilite une activité sur la conception expérimentale) ou le partage d'expérience avec d'autres enseignants, lors d'échanges de pratiques.

6.2.2. Méthode expérimentale

Pour répondre à ces questions de recherche, nous sommes en train d'exploiter deux types de données parmi toutes celles recueillies dans les projets IDEX-formations (Mandran et al., 2019) : le contenu des missions proposées par les enseignants et des entretiens avec les enseignants. L'analyse des traces informatiques de l'activité des étudiants peut apporter des informations supplémentaires pour répondre aux questions de recherche. Ce type de donnée ne sera pas détaillé dans ce mémoire, mais sera mentionné dans le texte suivant quand c'est pertinent.

6.2.2.1. Analyse des missions

Les missions proposées par les enseignants dans LabNbook donnent des informations sur l'enseignement mis en place, sur leurs stratégies de guidage et sur les attendus des enseignants. Nous regardons les missions « avant travail » telles que les enseignants les proposent aux étudiants, avec plus ou moins de structuration, de contenu pré-rempli, de consignes et de ressources.

Le corpus de données est constitué d'environ 150 missions créées dans LabNbook, correspondant à 18 unités d'enseignement. Ces enseignements ont été effectués entre juin 2017 et décembre 2019, et correspondent à un niveau d'étude universitaire allant de la première année d'université au master 2.

Le nombre d'étudiants qui ont suivi ces enseignements va de petits groupes de 10 étudiants à des cohortes de 350 étudiants, mais cette variable n'est pas importante pour cette recherche. Selon les enseignements, il existe deux ou trois versions des missions correspondant à différentes années universitaires.

6.2.2.2. Entretien avec des enseignants

Les entretiens effectués avec des enseignants peuvent nous donner des informations sur leurs motivations à utiliser LabNbook pour mettre en place leur pédagogie, et sur leurs stratégies de guidage. Des entretiens de type semi-directifs ont été réalisés avec les responsables d'enseignement impliqués dans le projet. Ils s'inscrivent dans les approches de type qualitatif et permettent de produire des données de nature narrative : aidé d'un guide d'entretien préconstruit à partir des questions de recherche initiales, l'intervieweur conduit la personne interrogée à préciser et à justifier ses propos. Les entretiens peuvent donc fournir des éléments de compréhension beaucoup plus précis, favorisant l'interprétation des données observées avec l'analyse des missions. Deux vagues d'entretiens ont eu lieu :

- Avant utilisation de la plateforme afin d'identifier les attentes et les motivations des enseignants à utiliser LabNbook dans le cadre de leur enseignement (en 2017).
- En fin de projet (fin 2019), les enseignants ont été interrogés sur leur satisfaction à l'issue de leur expérience et sur la manière dont ils ont utilisé la plateforme et fait évoluer leurs séquences. L'objectif est de compléter l'analyse des situations pédagogiques observées dans les missions.

Un total de 35 entretiens d'enseignants sont disponibles (15 pré-enseignement et 20 post-enseignement).

A partir des questions de recherche, des catégories ont été définies a priori et des verbatim ont été extraits des entretiens en lien avec ces catégories : « travail sur la démarche », « guidage », « réussite-échec de la stratégie », « perception des besoins des étudiants ».

6.2.2.3. Utilisation des données pour répondre aux questions de recherche

Voici la synthèse des données qui sont en cours d'utilisation pour répondre aux différentes questions de recherche.

- *QR1 : Quels types de tâches de la démarche expérimentale sont confiées aux étudiants ?*

Pour répondre à cette question, nous analysons les missions selon la grille proposée dans la Figure 24. Nous regardons pour chaque étape de la démarche si la tâche est en jeu (non pertinent correspond à une tâche non mise en jeu), et dans quelle mesure elle est à la charge de l'étudiant (3 niveaux : donné par l'enseignant, à la charge de l'étudiant ou un intermédiaire nommée co-construction enseignant-étudiant). Quand l'analyse des missions ne permet pas de répondre à la question (codage NSP pour ne sait pas), l'information est recherchée du côté de l'entretien, dans la catégorie « travail sur la démarche ».

Nous mettons un accent particulier sur la conception de l'expérience en séparant le principe de la manipulation et le mode opératoire dans nos analyses.

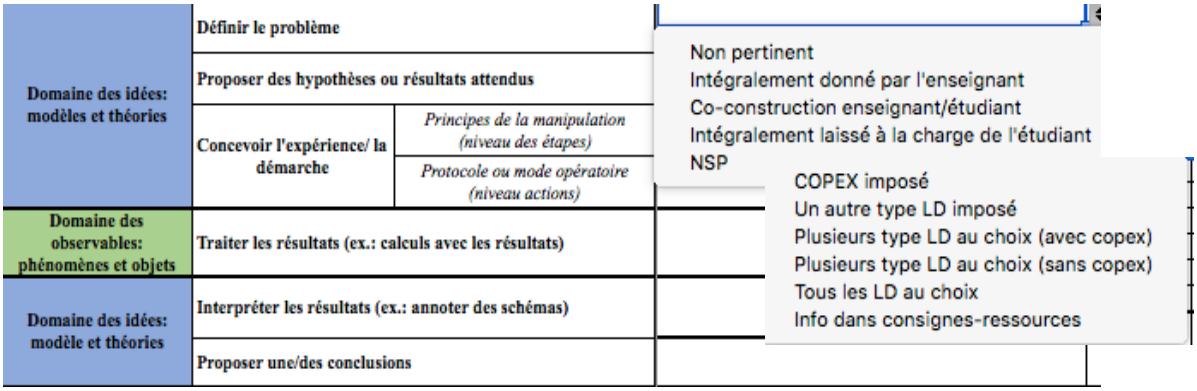


Figure 24. Détail de la grille d'analyse des missions pour évaluer les étapes de la démarche dévolues à l'étudiant (NSP : ne sait pas ; LD : labdoc, un élément de rapport).

- *QR2 : Quels éléments de guidage sont apportés par l'enseignant, par l'intermédiaire de LabNbook, lorsqu'une tâche est en partie, ou totalement à la charge des étudiants ?*

Pour répondre à cette question de recherche, nous utilisons le contenu des missions proposées par les enseignants, avec un recours ponctuel aux entretiens dans lesquels nous recherchons des verbatims dans les entretiens pré et post-enseignement, correspondant aux catégories « guidage » et « perception des besoins des étudiants » qui pourraient justifier des choix de guidage.

A partir de la revue de la littérature effectuée sur les guidages (voir partie 5.1), une nouvelle classification des guidages possibles avec un EIAH est proposée. Elle distingue les intentions de guidages et les moyens pour y parvenir. Les intentions sont celles proposées par van de Pol et al. (2010), tandis que les moyens de guidage reposent à la fois sur la classification de van de Pol et al. (2010), celle de Zacharia et al. (2015), et enfin le modèle praxéologique qui distingue la praxis (les types de tâches et les techniques) et le logos (les technologies et les théories). En complément, une information sur le guidage fixe ou adaptatif est indiquée, d'après Azevedo et al. (2004). Cela est synthétisé dans le Tableau 18.

L'analyse des missions proposées par les enseignants permet d'accéder uniquement aux informations sur les guidages fixes. Ainsi, nous prévoyons de caractériser les guidages mis en place par les enseignants dans les activités mettant en jeu la plateforme LabNbook, selon la classification proposée dans le Tableau 18 en excluant le tableau de bord de performance qui est un guidage adaptatif uniquement. Une entrée par les moyens de guidage semble le plus facile à mettre en œuvre, avec ensuite une réflexion sur les intentions de guidage associées.

Intentions de guidage	Moyens de guidage : Fixe (F) ou Adaptatif (A)

• Supporter les activités métacognitives des étudiants :
  o maintien de l'orientation
• Supporter les activités cognitives des étudiants :
  o structuration cognitive
  o réduction des degrés de liberté
• Supporter l'affect des étudiants :
  o enrôlement
  o gestion des éventualités / contrôle de la frustration
	• Tableau de bord de performance (A)
	• Consignes sur l'activité (F / A)
	• Questionnement (F / A)
	• Information sur la technique (F / A)
	• Information sur la technologie ou la théorie (F / A)
	• Technique donnée (F / A)
	• Structuration par un outil (F / A)

Tableau 18. Proposition d'une nouvelle classification des guidages par un EIAH, élaborée à partir d'une revue de la littérature.

Le Tableau 19 propose une première grille d'analyse des missions pour mettre en évidence les moyens de guidage fixe. Pour rappel, la Figure 5 fournit la copie d'écran d'une mission dans LabNbook.

Moyens de guidage fixe	Éléments recherchés dans les missions LabNbook
Consignes sur l'activité	Consignes données pour accompagner les étudiants dans leur démarche, dans différents espaces : (a) dans les consignes générales, (b) dans l'espace dédié pour les consignes au niveau d'une partie de rapport, (c) dans un labdoc créé par l'enseignant spécifiquement pour des consignes.
Questionnement	Questions posées dans la plateforme aux étudiants pour les faire réfléchir sans pour autant leur donner une information.
Informations sur la technique	Éléments de réponse avec les tâches co-construites par l'enseignant et les étudiants (voir résultats de QR1).
Informations sur la technologie ou la théorie	Notions de cours données dans différents espaces : (a) dans les ressources, partie documents, (b) dans d'autres espaces du rapport, a priori pas prévus pour cette utilisation, tels que les consignes ou des labdocs.
Technique donnée	Éléments de réponse avec les tâches intégralement prises en charge par l'enseignant (voir résultats de QR1). Dans certains cas la technique peut être donnée mais nécessite une reformulation de la part de l'élève.
Structuration par un outil	Nombre de parties de rapport, nombre de labdocs pré-remplis par l'enseignant, type de labdocs à créer disponibles. Accompagnement de la tâche de conception expérimentale par l'outil Copex. Accompagnement du traitement des données avec l'outil Fitex.

Tableau 19. Les éléments de guidage fixe recherchés dans les missions LabNbook.

De plus, il peut être intéressant d'analyser les stratégies de guidage employées pour répondre aux questions suivantes. Des guidages sont-ils combinés entre eux ? Lorsqu'il y a plusieurs activités expérimentales dans un enseignement, observons-nous une évolution dans les guidages proposés ?

Quant au guidage adaptatif, son étude nécessiterait une autre méthodologie. D'une part, le guidage adaptatif peut être effectué directement par l'enseignant en séance, et cela impliquerait des observations de classe que nous n'avons pas réalisées car ce n'est pas l'objet de notre étude. D'autre part, un guidage adaptatif est possible dans la plateforme, grâce à une fonctionnalité de LabNbook qui permet à

l'enseignant de mettre des annotations sur le rapport des étudiants. Pour prolonger ce travail, il sera intéressant d'analyser des traces correspondant aux annotations.

- *QR3. Comment évoluent les pédagogies mises en œuvre (étapes de la démarche et guidage) entre les différentes années d'utilisation de la plateforme ?*

Il est nécessaire de répondre aux questions de recherche précédentes année par année, et ensuite de comparer une mission donnée (ou groupe de missions) d'une année sur l'autre. Cette comparaison va nous informer sur les éventuelles modifications apportées par les enseignants. L'analyse des entretiens, avec notamment la catégorie « réussite-échec de la stratégie », pourra donner des informations complémentaires sur les raisons évoquées par les enseignants pour l'évolution des missions, notamment dans le cas où une transformation pédagogique est identifiée.

Ce travail est en cours de réalisation. Nous avons récemment effectué une étude de cas, sur le guidage proposé par des enseignants dans une école d'ingénieur, pour mener une démarche expérimentale (Wajeman et al., 2021). Ce travail n'est pas détaillé dans ce document. L'analyse que nous sommes en train de réaliser, décrite dans ce document, nous permettra de décider la pertinence d'effectuer d'autres études de cas de situations d'enseignement à moyen terme.

6.3. LabNbook et les tableaux de bord étudiant

Il s'agit d'un travail nouveau, qui s'inscrit dans le champ de l'analyse de l'apprentissage des EIAH (*learning analytics* en anglais). L'exploitation des traces numériques d'activités des étudiants permettra d'accéder facilement à des informations sur un grand nombre d'étudiants. Cela est rendu possible par le grand nombre d'utilisateurs de LabNbook (plus de 5 millions de traces d'activités). Les indicateurs affichés dans un tableau de bord (*dashboard* en anglais) visent souvent la facilitation de la régulation des apprentissages individuels des étudiants et du travail par groupe.

Avec des collègues de l'équipe MeTAH, nous avons démarré ce travail qui inclut une première partie sur la conception de ces tableaux de bord, qui sera suivie d'une évaluation de leurs utilisations.

A ce stade de notre avancement, nous avons démarré les tâches suivantes :

- Réfléchir aux besoins potentiels des enseignants pour leurs étudiants.
- Choisir des indicateurs en lien avec les possibilités offertes par la plateforme LabNbook et des visualisations associées.
- Réfléchir à la méthode adaptée pour évaluer nos propositions avec les utilisateurs.

6.3.1. Etat de l'art sur les attentes des enseignants

Une première approche du domaine fut la lecture des articles de Bodily et Verbert (2017) et de Sedrakyan et al. (2019). Ces articles nous ont aidé à nous questionner sur les objectifs visés par l'introduction d'un tableau de bord pour les étudiants dans LabNbook, et quels étaient les besoins des étudiants. Bodily et Verbert (2017) proposent une revue de la littérature effectuée sur 93 articles. Parmi les analyses effectuées, les auteurs cherchent à caractériser les tableaux de bords proposés aux étudiants en fonction de leur(s) objectif(s), de leur(s) fonctionnalité(s) et des types de données qu'ils collectent. Les résultats montrent que les systèmes les plus répandus correspondent aux fonctionnalités suivantes.

- Des systèmes comportant une visualisation améliorée : les données sont affichées visuellement dans un graphique ou un tableau de bord et comprennent également une caractéristique de comparaison des données d'un étudiant avec celles de la classe, ou bien une caractéristique offrant à l'étudiant la possibilité d'interagir avec le système.
- Des systèmes de recommandation par exploration de données (*data mining* en anglais) : l'exploration de données par un processus statistique automatique est effectuée sur les données avant

qu'elles ne soient communiquées aux étudiants (par exemple, l'utilisation de techniques de filtrage collaboratif pour recommander des ressources à un élève en fonction de leur similarité avec d'autres élèves).

Quant aux types de données utilisées dans les systèmes, elles sont variées, mais, de façon prépondérante, les systèmes collectent des données sur les interactions sociales et les ressources utilisées et dans une moindre mesure des données liées au temps passé pour accéder aux ressources.

Dans l'article de Sedrakyan et al. (2019), les auteurs proposent un cadre conceptuel pour guider la conception et le développement de tableaux de bord pour l'éducation. Les éléments suivants permettent de catégoriser les tableaux de bords.

- L'objectif visé : des rétroactions sont proposées avec différentes finalités possibles :
    - rétroaction orientée vers les résultats ou le processus,
    - rétroaction sommative (par exemple l'utilisation des ressources), ou en temps réel (immédiatement pendant un processus d'apprentissage) ou prédictive (par exemple, identification des risques d'échec).
- La typologie des rétroactions : rétroaction d'ordre cognitif ou comportemental :
    - des explications qui visent à améliorer la dimension cognitive de l'acquisition de connaissances,
    - des guidages qui tendent à influencer le comportement d'un apprenant, comme par exemple en l'engageant dans un type d'activité spécifique censé être lié à un parcours d'apprentissage réussi.
- Les destinataires (dans leur étude, apprenants seuls ou en groupe et enseignants).
- Le type de tâches d'apprentissage (par exemple, la résolution de problèmes, l'apprentissage en solo, l'apprentissage en groupe, ...).
- Les caractéristiques de l'analyse des données (par exemple, données statiques/dynamiques avec différents niveaux de dimensionnalité et agrégations analysées par des techniques statistiques, d'exploration de données, et des techniques orientées processus/séquence).

6.3.2. Indicateurs et visualisations dans LabNbook

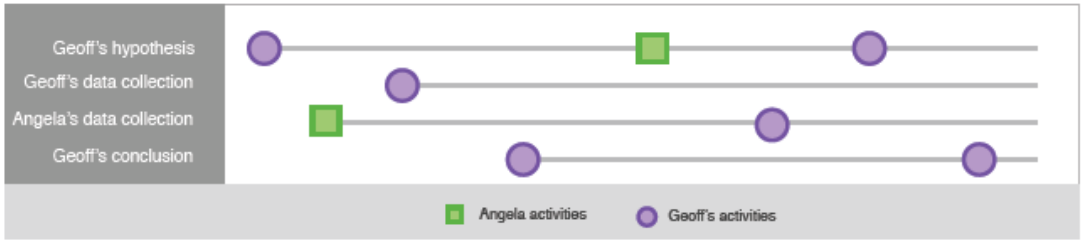
A partir de l'étude bibliographique, nous avons réfléchi aux indicateurs pertinents de proposer aux étudiants dans LabNbook, en prenant en compte les contraintes de la plateforme. L'objectif visé peut être de plusieurs types, la finalité pouvant être aussi bien de proposer une rétroaction sommative, qu'en temps réel. Il n'y a pas de contenu prédéfini dans la plateforme, ni de modèle pédagogique imposé, car chaque enseignant ajoute le contenu de son choix. Ainsi, les rétroactions d'ordre cognitif ne pouvant pas être effectuées facilement de façon automatique par la plateforme, nous nous intéresserons aux rétroactions d'ordre comportemental.

Nous identifions trois types de besoins potentiels et pour chacun listons des indicateurs. Le Tableau 20 résume ces informations dans ses deux premières colonnes. Suite à cette liste d'indicateurs, nous imaginons comment ils peuvent être présentés aux étudiants. Il existe de nombreuses techniques pour représenter visuellement les données. Pour choisir la visualisation la plus adaptée pour un certain type de données et avec des objectifs spécifiques, nous avons commencé par explorer des travaux d'autres chercheurs. Sedrakyan et al. (2019) détaillent diverses taxonomies proposées dans la littérature pour guider les choix de visualisations. A partir de là, ces auteurs proposent une liste de concepts à considérer pour proposer des visualisations dans le contexte des tableaux de bord :

- Objectif de la visualisation : comparaison, relation, tendance dans le temps.
- Raisons de la visualisation : explorer, découvrir, résumer, présenter, apprécier.

- Pertinence de l'information et niveau de détail : adaptation au public approprié, c'est-à-dire aux apprenants et aux enseignants.
- Caractéristiques des données telles que la dimensionnalité et les propriétés structurelles, comme la continuité, les intervalles et les agrégations/ratios.
- Types de graphiques par objectifs de visualisation.
- Autres mesures de visualisation : efficacité, expressivité, lisibilité, et interactivité.

Charleer et al. (2016) ont analysé cinq tableaux de bord différents à destination des étudiants dans un contexte d'enseignement impliquant une démarche d'investigation. Parmi les exemples de visualisations étudiées, l'une d'elles a retenu notre attention. L'objectif principal de cette visualisation est de faciliter l'exploration collaborative des parcours des apprenants, c'est-à-dire la séquence chronologique de toutes les activités et artefacts générés.



La visualisation affiche une ligne horizontale par activité des utilisateurs, par exemple la création d'une hypothèse par un apprenant, suivie de tous les commentaires, évaluations et modifications de cette hypothèse. La chronologie est maintenue à travers les lignes, permettant à l'utilisateur de voir l'impact qu'un événement peut avoir sur d'autres lignes parallèles.

A partir d'une évaluation des tableaux de bord réalisée avec les utilisateurs, ces auteurs présentent les leçons apprises et proposent des recommandations par rapport aux données qui doivent être accessibles aux étudiants, et comment ces données doivent être représentées. Les informations qui peuvent être utiles pour notre étude sont reportées ci-après.

Une importante question concerne la surcharge d'information dans les visualisations, initialement décrite par Shneiderman (1996) avec son mantra « *Overview first, zoom and filter, then details-on-demand* », que l'on retrouve dans les propositions de Charleer et al. (2016).

- Les étudiants apprécient les visualisations agrégées qui leur permettent de lire rapidement les résultats dans un premier temps, car il y a moins de charge cognitive.
- L'accès au détail permet de donner du sens si les étudiants le cherchent.
- Ainsi, sur la même visualisation, il est « plus efficace » (selon les utilisateurs) d'avoir une visualisation agrégée et le détail accessible au survol à la demande. A travers ce détail, il est important pour les étudiants d'avoir un accès direct aux productions car cela leur permet la re-contextualisation des indicateurs.
- Il est important d'intégrer l'utilisation des tableaux de bord dans le processus du travail, afin que les étudiants soient confrontés régulièrement aux données.
- Ajouter des informations pour situer ses résultats.

Nous pensons que ce dernier point doit être considéré avec précaution, car nous ne voulons pas inciter un climat de compétition entre étudiants. Situer ses résultats par rapport à une norme indiquée par l'enseignant (p. ex. le temps de travail attendu) peut être intéressant mais montrer la valeur d'un indicateur et la comparer à celle des autres étudiants d'un groupe de travail pourrait être contre-productif.

Nous avons alors commencé à réfléchir aux visualisations pour chacun des indicateurs. Ils sont décrits dans la troisième colonne du Tableau 20. De nombreuses questions subsistent à ce niveau du travail. Par exemple, par rapport à la question de la surcharge cognitive, lorsque pour un indicateur, nous prévoyons un affichage à la fois au niveau de l'équipe et au niveau de l'étudiant, nous pourrions envisager d'afficher seulement l'un des deux et le deuxième apparaitrait au survol.

En parallèle des affichages, faut-il envoyer des alertes aux étudiants, et si oui à quel moment ? Sous quelle forme (par messagerie, grâce à une icône dans LabNbook…). Pour nous aider à répondre à ces questions, nous envisageons d'interroger les utilisateurs. C'est ce qui sera discuté dans la partie suivante.

Objectif de la rétroaction	**Indicateurs**	**Visualisations imaginées**
Aider les étudiants dans la gestion de leur temps.	Durée avant la date de rendu de rapport.	Localisation sur la page d'accueil des missions : • Chiffre brut si seulement la date de fin est donnée par l'enseignant. • Durée visualisée si les dates de début et de fin sont renseignées : sous forme de barre, horloge ou code couleur, …
Aider les étudiants à prendre conscience de leur gestion d'informations disponibles.	Nombre d'annotations reçues et lues.	Deux localisations : • Sur la page d'accueil des missions, informations pour la mission. • Dans le rapport, informations par partie de rapport. Deux informations : Nombre d'annotations lues sur nombre total. • Pour l'étudiant. • Pour l'équipe. Barre normalisée, avec code couleur ?
	Lecture des ressources intégrées dans la mission par l'enseignant.	Sur la page d'accueil des missions, informations pour la mission. Deux informations : Nombre ressources consultées sur nombre total. • Pour l'étudiant. • Pour l'équipe. Barre normalisée, avec code couleur ?
Aider les étudiants à gérer le travail en équipe.	Information sur la contribution de chaque membre de l'équipe à l'écriture du rapport.	Deux localisations : • Sur la page d'accueil des missions, informations pour la mission. • Dans le rapport, informations par labdoc. Deux informations : Temps d'écriture. • Pour l'étudiant. • Pour l'équipe. Barre normalisée, camembert, avec code couleur ?

Tableau 20. Propositions de rétroactions pour les étudiants dans LabNbook, décrits en termes d'objectifs de la rétroaction, indicateurs et visualisations.

6.3.3. Évaluation des propositions d'indicateurs et visualisations

Que nous apprennent l'état des recherches dans le domaine ? Bodily et Verbert (2017) se sont demandés (1) quelles méthodes sont utilisées pour évaluer ces tableaux de bords dans la littérature et (2) les études du domaine considèrent-elles l'effet de ces tableaux de bords sur le comportement, la réussite et les

compétences acquises par les étudiants ? A partir des 93 articles de recherche analysés, ils concluent que :

- 6 % des études incluent l'évaluation des besoins.
- 15 % des études justifient la sélection des données récoltées.
- Très peu d'études rendent compte d'un processus de conception visuelle, avec le choix des visualisations.
- 11 % des études présentent un test d'utilisabilité qui ne se contente pas de demander aux étudiants leur avis par une enquête pour évaluer leur perception de l'utilisabilité de la plateforme.
- 16 % des études s'intéressent aux effets de l'EIAH sur le comportement des étudiants (mais les effectifs considérés ne sont pas toujours suffisamment élevés), 15 % examinent l'effet de leur système sur la réussite des étudiants et 3 % l'effet sur les compétences acquises par les étudiants.

Verbert et al. (2020) font une synthèse des recherche passées et présentes sur ce sujet et proposent les conclusions d'un atelier sur les « Approches visuelles de l'analyse de l'apprentissage » qui s'est tenu à la conférence LAK 19 avec des experts du domaine afin d'identifier les pratiques communes et les défis du domaine. Bien qu'il y ait eu d'importants efforts dans les recherches menées autour des tableaux de bord, les experts pensent que le domaine manque encore de maturité et doit tirer davantage de leçons des expériences passées. Il existe encore des manques à propos de l'évaluation des besoins en amont, il n'y a pas de consensus sur les méthodes d'évaluation à mettre en œuvre, et les questions d'éthique devraient être davantage considérées.

Michos et al. (2020) présentent deux exemples de co-conception de tableaux de bords avec des enseignants. Des idées émergent pour la conception des tableaux de bords, qui sont des solutions aux problèmes que se posent les enseignants. Ces auteurs indiquent également qu'il n'est pas facile pour les enseignants de s'éloigner des visualisations traditionnelles, telles que des diagrammes à barre ou des tableaux.

Schwendimann et al. (2017) proposent une revue de la littérature sur les types de recherche existantes autour des tableaux de bord, à partir de l'étude de 55 articles de recherche. Les questions de recherche posées concernent le contexte d'utilisation des tableaux de bord, le type d'informations présentes et le type d'évaluations menées. Les résultats principaux issus de cette étude sont résumés ci-dessous.

- Les utilisateurs sont principalement les enseignants (75 %) puis les étudiants (51 %), au niveau universitaire (53 %).
- Les traces d'activité sont les sources principales d'information pour les tableaux de bord (85 %), avec en général un seul type de données considérées. Les visualisations s'adressent principalement à l'étudiant unique (85 %), mais contiennent aussi des indicateurs reliés à la classe entière (45 %). Les types de visualisations présentes sont par ordre d'importance décroissante : diagrammes à barres, graphiques linéaires, tableaux, graphiques circulaires (camemberts)…
- La majorité des articles ne comportent pas d'évaluation (58 %). Quand il y a une évaluation, elle est parfois en situation écologique (29 %), avec souvent l'utilisation de méthodes mixtes (techniques quantitatives et qualitatives) et plusieurs types de données combinées. Les effectifs des utilisateurs sont classiquement dans la fourchette 30-150 étudiants et 3-9 enseignants, à l'exception de deux études qui comportent plusieurs centaines d'utilisateurs. Les questionnaires et interviews sont majoritaires, dans le but de recueillir la satisfaction des utilisateurs quant à l'utilisabilité et l'utilité, afin d'améliorer les tableaux de bord. Plusieurs évaluations visaient à déterminer si le tableau de bord améliorait la prise de conscience des utilisateurs, tandis que quelques autres tentaient d'évaluer les changements de motivation et de comportement induits par l'utilisation des tableaux de bord ; d'autres encore évaluaient l'impact de l'utilisation des tableaux de bord sur la collaboration (trois

articles). Très peu d'études ont réellement examiné (et fourni des preuves) l'impact de ces technologies sur l'apprentissage.

Nous envisageons une évaluation à deux niveaux.

A court terme, nous prévoyons de valider des propositions de conception avec les utilisateurs avant de développer les interfaces. Si nous ne sommes pas directement dans une méthode de co-conception comme Michos et al (2020) la décrivent, nous allons prendre en compte l'avis des utilisateurs quant à l'intérêt des indicateurs proposés par rapport aux situations d'enseignement. Nous prévoyons de recueillir à la fois l'avis des étudiants et des enseignants pour vérifier, dans les deux, cas si les indicateurs correspondent à leurs besoins. Nous travaillerons par le biais de focus groups comme méthode d'entretien, qui fait également partie de la méthode mise en œuvre par Michos et al (2020). Dans un premier temps, nous allons préparer des maquettes des visualisations, en proposant plusieurs visualisations des indicateurs décrits dans le Tableau 20. Nous envisageons la possibilité de faire un deuxième focus group avec des étudiants, avec de nouvelles maquettes, selon les résultats des premiers focus groups.

A plus long terme, une fois les visualisations implémentées dans LabNbook, nous irons plus loin dans l'évaluation en considérant l'activité des étudiants en situation écologique. Même si les études montrent qu'il y a un déficit d'évaluation en termes d'apprentissage, nous ne pourrons pas aller dans ce sens car il n'est pas envisagé de proposer dans LabNbook des rétroactions d'ordre cognitif. En revanche, nous pourrons évaluer l'impact de l'utilisation des tableaux de bord sur le comportement des étudiants. D'après Azevedo (2005), l'étayage par un EIAH peut soutenir divers objectifs pédagogiques dont l'apprentissage de son propre apprentissage, comme la métacognition, et l'apprentissage autorégulé. La littérature sur l'apprentissage autorégulé pourra nous servir de point d'entrée pour l'évaluation de l'utilisation des tableaux de bord par les étudiants.

Chapitre 7 - Conclusion

Si les démarches de type investigation ou *Inquiry Based Science Learning* (IBSL) ont été initialement promues au niveau de l'école primaire et secondaire, avec en particulier le rapport Rocard de la commission Européenne (2007), plus récemment les politiques ont encouragé des méthodes d'enseignement dites « active learning » ou « student-activating methods », ou encore « student centered learning » au niveau de l'enseignement supérieur.

La lecture récente de l'article de Fischer et Hänze (2019) semble adaptée pour alimenter la conclusion de ce mémoire. L'introduction de leur article résume le débat des quinze, vingt dernières années sur l'efficacité des méthodes d'enseignement innovantes qui impliquent les étudiants en tant que participants actifs à leur propre apprentissage. Sont résumées ci-dessous les idées qu'ils développent.

Il existe une tendance à la hausse de l'approche d'apprentissage constructiviste dans laquelle les formats d'apprentissage sont censés conduire à une compréhension plus profonde, à une motivation plus forte et à un plus grand développement des compétences chez les étudiants, alors que les formats d'enseignement traditionnels sont censés produire des connaissances inertes et donc moins efficaces. Fischer et Hänze (2019) rappellent que le concept de constructivisme et ses implications pour la pratique pédagogique font l'objet d'un débat de longue date qui trouve son origine dans les compréhensions divergentes, et donc l'utilisation incohérente du terme constructivisme. Ce débat se trouve être alimenté par deux points de vue presque opposés.

Schématiquement, le premier point de vue considère le constructivisme comme une approche de l'enseignement centrée sur l'étudiant et se préoccupe principalement de formats d'apprentissage spécifiques, tandis que l'autre point de vue avance que le constructivisme est principalement une théorie expliquant les mécanismes cognitifs de l'apprentissage et ne donne pas de conclusions immédiates sur les méthodes d'enseignement recommandables ; tout environnement d'apprentissage, s'il est efficace, sera inévitablement constructif. Les deux branches du constructivisme s'accordent sur le fait que les connaissances sont construites activement par l'apprenant ; mais il existe un désaccord quant aux conclusions pour la pratique pédagogique et les méthodes d'enseignement à utiliser.

Aujourd'hui, un grand nombre d'études confirment la supériorité des formats d'apprentissage centrés sur l'étudiant dans l'enseignement supérieur. Contrairement à ces résultats, cependant, un certain nombre d'études ont, soit trouvé des avantages aux approches d'enseignement traditionnelles, soit n'ont pas mis en évidence la moindre différence entre les modes d'enseignement. Le constat est donc qu'aucune image claire ne se dégage de l'examen des publications sur l'enseignement centré sur l'étudiant dans l'enseignement supérieur. Un défi lié à la recherche sur les méthodes d'enseignement est le fait que l'efficacité de l'enseignement dépendra toujours de la mise en œuvre concrète de toute approche pédagogique. C'est l'adéquation et la qualité de la réalisation d'une méthode qui sont finalement décisives. Ainsi, lorsque l'on compare différentes méthodes, on se demande toujours si la qualité de la mise en œuvre était réellement la même. Étant donné qu'un certain nombre d'études visent à démontrer l'avantage d'une approche pédagogique - actuellement, il s'agit surtout de méthodes centrées sur l'étudiant -, on peut parfois se demander si le format d'enseignement dans la condition de contrôle a été mis en œuvre de manière aussi approfondie que celui qui fait l'objet de l'enquête.

Contrairement à la majorité des études portant sur l'efficacité des approches pédagogiques, l'étude présentée par Fischer et Hänze (2019) est une étude de terrain analysant l'enseignement universitaire « réel », tel qu'il se pratique couramment. L'unité de cette étude n'est pas le cours dans son ensemble mais chaque élément du cours est caractérisé selon le type de méthode utilisé (l'enseignant guide ou l'étudiant est actif). Les données empiriques suggèrent qu'il pourrait y avoir un désavantage à utiliser

des méthodes dites « student-activating methods », alors que les formats d'apprentissage guidés par l'enseignant semblent être bénéfiques. Parmi les hypothèses pouvant expliquer ces résultats, les auteurs remettent en question le manque de formation des enseignants aux méthodes d'enseignement centrées sur l'étudiant. Cela fait écho aux travaux de Aditomo et Klieme (2020) qui montrent que l'enseignement par investigation peut être associé à un apprentissage efficace lorsqu'il est associé à un guidage par les enseignants.

Deux liens peuvent être faits entre cette étude et les travaux que nous avons menés. Tout d'abord, si le guidage par les enseignants est nécessaire, une aide complémentaire peut être apportée par des EIAH, et c'est ce que nous proposons avec les divers EIAH conçus dans notre équipe. Ensuite, une originalité de leur travail est de considérer qu'un enseignement est composé de différentes phases, certaines étant guidées par l'enseignant, d'autres étant à la charge de l'étudiant. C'est pourquoi nous parlons de démarches expérimentales (au pluriel), car les étudiant peuvent vivre une multitude d'expériences d'enseignement, l'étudiant va seulement être acteur d'une ou plusieurs étapes d'une démarche expérimentale. Une réflexion de Michèle Artigue lors d'un colloque sur l'enseignement des mathématiques à l'école primaire organisé par l'Académie des sciences en 2018 (https://public.weconext.eu/academie-sciences/2018-12-12/video_id_001/index.html) va dans ce sens : elle parle des « difficultés … de fonder à grande échelle l'enseignement des mathématiques sur l'investigation, en dépit de réussites locales » et de « l'importance d'apprendre à faire vivre au quotidien de réels moments d'investigation aux élèves, au cours d'activités mathématiques a priori plus classiques ».

Le guidage d'une démarche expérimentale et de la conception expérimentale par un environnement informatique est une vaste question à laquelle ce mémoire tente d'apporter une contribution. Nous avons proposé des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) destinés principalement à l'enseignement supérieur. Les travaux présentés dans ce mémoire concernent deux types d'EIAH, qui impliquent des guidages différents.

Le premier cas correspond à un guidage adaptatif, qui avait été initié avec le logiciel Copex-chimie, puis a évolué plus récemment avec TitrAB. Cet EIAH embarque des contenus disciplinaires, ce qui nous a permis de mettre en place un diagnostic qui a évolué au cours des dernières années pour tendre vers un diagnostic épistémique. Des rétroactions sont fournies à l'élève suite au diagnostic. Elles se sont enrichies dernièrement avec l'utilisation du modèle T4TEL qui nous a permis de modéliser l'activité de l'étudiant. Les études en cours et à venir nous permettront d'étudier la pertinence de la modélisation utilisée pour les rétroactions, et de réfléchir à des parcours d'apprentissage.

La deuxième approche est celle choisie avec LabNbook, dans laquelle les premiers travaux concernaient l'étude des guidages fixes dans l'outil de conception expérimentale Copex et dans l'ensemble des outils de LabNbook (études de cas, avec une analyse manuelle du contenu disciplinaire). Les travaux plus récents s'intéressent davantage à la prise en main de la plateforme par les enseignants, dans laquelle nous avons étudié la mise en œuvre de la démarche expérimentale par les enseignants et les guidages associés. Une nouvelle orientation dans nos recherches porte sur la conception de tableaux de bords grâce à l'exploitation des traces numériques d'activités des étudiants, permettant de faire des rétroactions automatiques à des étudiants sur leur comportement dans le travail effectué avec LabNbook. Notre étude pourra s'appuyer sur les travaux autour de l'autorégulation pour analyser l'impact de ces tableaux de bord. Enfin, de futures recherches avec LabNbook pourront combiner une étude didactique liée à un contenu d'enseignement spécifique avec l'apport des traces d'activité, notamment grâce à l'intégration future d'un outil d'évaluation dans la plateforme.

Bibliographie

Abrahams, I., & Millar, R. (2008). Does Practical Work Really Work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. International Journal of Science Education, 30(14), 1945-1969. https://doi.org/10.1080/09500690701749305

Aditomo, A., & Klieme, E. (2020). Forms of inquiry-based science instruction and their relations with learning outcomes: Evidence from high and low-performing education systems. *International Journal of Science Education*, *42*(4), 504-525. https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1716093

Aleven, V., Ashley, K., Lynch, C., & Pinkwart, N. (2011). *Proceedings of the Workshop on Intelligent Tutoring Systems for Ill-Defined Domains*. https://core.ac.uk/display/21651527

Anamuah-Mensah, J. (1986). Cognitive strategies used by chemistry students to solve volumetric analysis problems. *Journal of Research in Science Teaching*, *23*(9), 759-769. https://doi.org/10.1002/tea.3660230902

Arce, J., & Betancourt, R. (1997). Student-designed experiments in scientific lab instruction. *Journal of College Science Teaching*, *27*(2), 114-118.

Azevedo, R., Cromley, J. G., & Seibert, D. (2004). Does adaptive scaffolding facilitate students' ability to regulate their learning with hypermedia? *Contemporary Educational Psychology*, *29*(3), 344-370. https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2003.09.002

Azevedo, R., & Hadwin, A. F. (2005). Scaffolding Self-regulated Learning and Metacognition – Implications for the Design of Computer-based Scaffolds. *Instructional Science*, *33*(5), 367-379. https://doi.org/10.1007/s11251-005-1272-9

Baker, L. M., & Dunbar, K. (1996). Constraints on the experimental design process in real-word science. *Proceeding of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*.

Baker, R. S., Corbett, A. T., Koedinger, K. R., & Wagner, A. Z. (2004). Off-task behavior in the cognitive tutor classroom: When students « game the system ». *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 383-390. https://doi.org/10.1145/985692.985741

Baker, R. S., Corbett, A. T., Roll, I., & Koedinger, K. R. (2008). Developing a generalizable detector of when students game the system. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, *18*(3), 287-314. https://doi.org/10.1007/s11257-007-9045-6

Balacheff, N. (1992). Exigences épistémologiques des recherches en EIAO. *Revue d'Ingénierie Educative*, *4/5*, 4-14.

Bataille, X., Beauvineau, E., Vigneron, M., Cheymol, N., & Mas, V. (2010). Investigation et analyse chimique : Un TP-défi d'analyse qualitative et quantitative... Sans aucune solution préparée ! *L'Actualité Chimique*, *337*, 45-50.

Bell, T., Urhahne, D., Schanze, S., & Ploetzner, R. (2010). Collaborative Inquiry Learning: Models, tools, and challenges. *International Journal of Science Education*, *32*(3), 349-377. https://doi.org/10.1080/09500690802582241

Belland, B. R., Kim, C., & Hannafin, M. J. (2013). A Framework for Designing Scaffolds That Improve Motivation and Cognition. *Educational Psychologist*, *48*(4), 243-270. https://doi.org/10.1080/00461520.2013.838920

Berthet, A., d'Ham, C., & Girault, I. (2017). TitrAB : un logiciel pour apprendre à élaborer le protocole d'un titrage acido-basique. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, *111*(997), 999-1012.

Berthet, A., Girault, I., & d'Ham, C. (2015). Difficultés d'élèves pour élaborer un protocole expérimental. Un exemple en classe de terminale S. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, *109*(978), 1395-1408.

Blanchard, M. R., Southerland, S. A., Osborne, J. W., Sampson, V. D., Annetta, L. A., & Granger, E. M. (2010). Is inquiry possible in light of accountability? A quantitative comparison of the relative effectiveness of guided inquiry and verification laboratory instruction. *Science Education*, *94*(4), 577-616. https://doi.org/10.1002/sce.20390

Bodily, R., & Verbert, K. (2017). Review of Research on Student-Facing Learning Analytics Dashboards and Educational Recommender Systems. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *10*(4), 405-418. https://doi.org/10.1109/TLT.2017.2740172

Bonnat, C. (2017). *Modélisation des connaissances et diagnostic automatique des erreurs des élèves lors de la conception de protocoles expérimentaux en biologie.* [Thèse]. Université Grenoble Alpes.

Bonnat, C., Marzin, P., Girault, I., & d'Ham, C. (2018). Modélisation didactique pour la conception d'étayages dans un EIAH : Exemple d'une activité de conception expérimentale en biologie. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, *25*(2), 31-61. https://doi.org/10.3406/stice.2018.1766

Bonnat, C., Marzin-janvier, P., & Girault, I. (2019). Analyse des conceptions d'élèves sur le vivant, dans une situation de conception expérimentale avec un environnement informatique. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *20*, Art. 20. https://doi.org/10.4000/rdst.2786

Bosch, M., & Chevallard, Y. (1999). La sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs. Objet d'étude et problématique. *Recherches en didactique des mathématiques*, *19*(1), 77-124.

Cairns, D., & Areepattamannil, S. (2019). Exploring the Relations of Inquiry-Based Teaching to Science Achievement and Dispositions in 54 Countries. *Research in Science Education*, *49*(1), 1-23. https://doi.org/10.1007/s11165-017-9639-x

Cariou, J.-Y. (2015). Le statut épistémologique de l'expérience dans les nouvelles approches préconisées pour l'enseignement des sciences. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *12*, Art. 12. https://doi.org/10.4000/rdst.1132

Chaachoua, H. (2019). T4TEL un cadre de référence didactique pour la conception des EIAH. In *Actes du séminaire de didactique des mathématiques 2018* (p. 8-25). IREM de Paris – Université Paris Diderot. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02421410

Charleer, S., Klerkx, J., Duval, E., De Laet, T., & Verbert, K. (2016). Creating Effective Learning Analytics Dashboards: Lessons Learnt. In K. Verbert, M. Sharples, & T. Klobučar (Éds.), *Adaptive and Adaptable Learning* (p. 42-56). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45153-4_4

Chevallard, Y. (1989). Le concept de rapport au savoir, Rapport personnel, rapport institutionnel. *Séminaire de didactique des mathématiques et de l'informatique*, *108*, 211-235.

Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : Perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *12*(1), 73-112.

Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *19*(2), 221-266.

Collins, A., Brown, J. S., & Newman, S. E. (1989). Cognitive apprenticeship: Teaching the craft of reading, writing, and mathematics. In *Knowing, learning and Instruction: Essays in honor of Robert Glaser.* (In L. B. Resnick (Ed.), p. 453-494.).

Croset, M.-C., & Chaachoua, H. (2016). Une réponse à la prise en compte de l'apprenant dans la TAD : La praxéologie personnelle. *Recherches en didactique des mathématiques*, *36*(2), 1-15.

de Jong, T., & Lazonder, A. W. (2014). The Guided Discovery Learning Principle in Multimedia Learning. In *In R. Mayer (Ed.), The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge Handbooks in Psychology, pp. 371-390. Cambridge University Press; https://books.google.fr/books?hl=en&lr=&id=r3rsAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA371&ots=iU9Q2

4S7T1&sig=YjEKOFHGIzGegTgU5Ik-RuzkQLw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.019

de Jong, T., Weinberger, A., Girault, I., Kluge, A., Lazonder, A., Pedaste, M., Ludvigsen, S., Ney, M., Wasson, B., Wichmann, A., Geraedts, C., Giemza, A., Hovardas, T., Julien, R., van Joolingen, W., Lejeune, A., Manoli, C., Matteman, Y., Sarapuu, T., … Zacharia, Z. (2012). Using scenarios to design complex technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, *60*(5), 883-901. https://doi.org/10.1007/s11423-012-9258-1

Develay, M. (1989). Sur la méthode expérimentale. *Aster*, *8*, 3-15.

de Vries, E. (2006). Students' construction of external representations in design-based learning situations. *Learning and instruction*, *16*, 213-227.

d'Ham, C., de Vries, E., Girault, I., & Marzin, P. (2004). Exploiting distance technology to foster experimental design as a neglected learning objective in labwork in chemistry. *Journal of Science Education and Technology*, *13*(4), 425-434.

d'Ham, C., Girault, I., & Berthet, A. (2019). Modèles et étayages pour l'élaboration de protocoles par les élèves : Cas des titrages acide-base. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *19*, 165-186. https://doi.org/10.4000/rdst.2474

d'Ham, C., Wajeman, C., Girault, I., & Marzin-Janvier, P. (2020). *Transposition de la démarche expérimentale dans un environnement numérique de support. LabNbook, de la caractérisation didactique à l'utilisation en situation écologique.* 11e rencontres scientifiques de l'ARDiST, Bruxelles, Belgique.

Donnelly, D. F., Vitale, J. M., & Linn, M. C. (2015). Automated Guidance for Thermodynamics Essays: Critiquing Versus Revisiting. *Journal of Science Education and Technology*, *24*(6), 861-874. https://doi.org/10.1007/s10956-015-9569-1

Dunbar, K. (1999). How scientists build models: InVivo science as a window on the scientific mind. In L. Magnani (Éd.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 89-98). Plenum Press. internal-pdf://Dunbar_99-3514110209/Dunbar_99.pdf

Etkina, E., Karelina, A., & Ruibal-Villasenor, M. (2010). Design and reflection help students develop scientific abilities: Learning in introductory physics laboratories. *The Journal of the Learning Sciences*, *19*(1), 54-98. https://doi.org/10.1080/10508400903452876

Etkina, E., Murthy, S., & Zou, X. (2006). Using introductory labs to engage students in experimental design. *American Journal of Physics*, *74*(11), 979-986. https://doi.org/10.1119/1.2238885

Fischer, E., & Hänze, M. (2019). Back from "guide on the side" to "sage on the stage"? Effects of teacher-guided and student-activating teaching methods on student learning in higher education. *International Journal of Educational Research*, *95*, 26-35. https://doi.org/10.1016/j.ijer.2019.03.001

Fournier-Viger, P., Nkambou, R., & Nguifo, E. M. (2010). Building Intelligent Tutoring Systems for Ill-Defined Domains. In R. Nkambou, J. Bourdeau, & R. Mizoguchi (Éds.), *Advances in Intelligent Tutoring Systems* (p. 81-101). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14363-2_5

Gerard, L., Matuk, C., McElhaney, K., & Linn, M. C. (2015). Automated, adaptive guidance for K-12 education. *Educational Research Review*, *15*, 41-58. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.04.001

Gerard, L., Ryoo, K., McElhaney, K. W., Liu, O. L., Rafferty, A. N., & Linn, M. C. (2016). Automated Guidance for Student Inquiry. *Journal of Educational Psychology*, *108*(1), 60-81. https://doi.org/10.1037/edu0000052

Giordan, A. (1999). *Une didactique pour les sciences expérimentales.* Edition Belin.

Girault, I., & d'Ham, C. (2014). Scaffolding a Complex Task of Experimental Design in Chemistry with a Computer Environment. *Journal of Science Education and Technology*, *23*(4), 514-526. https://doi.org/10.1007/s10956-013-9481-5

Girault, I., d'Ham, C., Ney, M., Sanchez, E., & Wajeman, C. (2012). Characterizing the Experimental Procedure in Science Laboratories: A preliminary step towards students experimental design. *International Journal of Science Education*, *34*(6), 825-854. https://doi.org/10.1080/09500693.2011.569901

Girault, I., Wajeman, C., & d'Ham, C. (2018). *Modèle de construction d'un EIAH pour une activité de conception expérimentale.* Actes du 6ème congrès international de la TAD, Autrans, France.

Guillon, A. (1995). Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy-Pontoise. *Didaskalia*, *7*(1), 113-127. https://doi.org/10.4267/2042/23770

Hofstein, A., & Lunetta, VN. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, *88*(1), 28-54. https://doi.org/10.1002/sce.10106

Hornsby, P. (2010). *Hierarchical Task Analysis: Innovating UX Practice*. https://www.uxmatters.com/mt/archives/2010/02/hierarchical-task-analysis.php

Jordan, R. C., Ruibal-Villasenor, M., Hmelo-Silver, C. E., & Etkina, E. (2011). Laboratory materials: Affordances or constraints? *Journal of Research in Science Teaching*, *48*(9), 1010-1025. https://doi.org/10.1002/tea.20418

Karavirta, V., Korhonen, A., & Malmi, L. (2006). On the use of resubmissions in automatic assessment systems. *Computer Science Education*, *16*(3), 229-240. https://doi.org/10.1080/08993400600912426

Karelina, A., & Etkina, E. (2007). Acting like a physicist: Student approach study to experimental design. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, *3*, 12 pages (online journal: http://prst-per.aps.org/).

Kim, N. J., Belland, B. R., & Axelrod, D. (2019). Scaffolding for Optimal Challenge in K-12 Problem-Based Learning. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, *13*(1). https://doi.org/10.7771/1541-5015.1712

Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, *41*(2), 75-86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1

Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-Analysis of Inquiry-Based Learning: Effects of Guidance. *Review of Educational Research*, *86*(3), 681-718. https://doi.org/10.3102/0034654315627366

Léna, P. (2018). La pédagogie d'investigation et l'enquête PISA 2015. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, *112*(1000), 7-32.

Leont'ev, A. N. (1978). *Activity, Consciousness, and Personality*. Prentice-Hal.

Linn, M. C., & Eylon, B.-S. (2011). *Science Learning and Instruction: Taking Advantage of Technology to Promote Knowledge Integration - Routledge*. http://www.routledge.com/books/details/9780805860559/

Lou, A. J., & Jaeggi, S. M. (2020). Reducing the Prior-Knowledge Achievement Gap by Using Technology-Assisted Guided Learning in an Undergraduate Chemistry Course. *Journal of Research in Science Teaching*, *57*(3), 368-392. https://doi.org/10.1002/tea.21596

Mandran, N., Girault, I., & D'Ham, C. (2014). *DC_TEL: Framework for assisting the data production and analysis in TEL. 2020*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02459494

Mandran, N., Marzin-Janvier, P., Planche, M., Karoui, A., & Girault, I. (2019). Processus d'évaluation longitudinale d'une plateforme pédagogique : Le cas de LabNbook. *Actes de la 9ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, 4-7 juin 2019*.

McElhaney, K. W., & Linn, M. C. (2011). Investigations of a complex, realistic task: Intentional, unsystematic, and exhaustive experimenters. *Journal of Research in Science Teaching*, *48*(7), 745-770. https://doi.org/10.1002/tea.20423

Michos, K., Lang, C., Hernández-Leo, D., & Price-Dennis, D. (2020). Involving teachers in learning analytics design: Lessons learned from two case studies. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Learning Analytics & Knowledge* (p. 94-99). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3375462.3375507

Millar, R. (2004). *The role of practical work in the teaching and learning of science*. Presented at the High school science laboratories: Role and vision, Washington DC: National Academy of Sciences.

Mitrovic, A., & Weerasinghe, A. (2009). Revisiting ill-definedness and the consequences for ITSs. In *Artificial Intelligence in Education: Building Learning Systems that Care: From Knowledge Representation to Affective Modelling* (Dimitrova, V., Mizoguchi, R., du Boulay, B., Graesser, A. (eds.)). IOS Press.

Morgan, K., & Brooks, D. W. (2012). Investigating a Method of Scaffolding Student-Designed Experiments. *Journal of Science Education and Technology*, *21*(4), 513-522. https://doi.org/10.1007/s10956-011-9343-y

Nkambou, R., Bourdeau, J., & Mizoguchi, R. (2010). Introduction: What Are Intelligent Tutoring Systems, and Why This Book? In R. Nkambou, J. Bourdeau, & R. Mizoguchi (Éds.), *Advances in Intelligent Tutoring Systems* (p. 1-12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14363-2_1

Ohlsson, S. (1992). Constraint-based student modelling. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, *3*(4), 429-447.

Ohlsson, S. (1996). Learning from error and the design of task environments. *International Journal of Educational Research*, *25*(5), 419-448. https://doi.org/10.1016/S0883-0355(97)81236-0

Ouertatani, L., & Dumon, A. (2008). L'appropriation des « objets de savoir » relatifs aux titrages acide-base par les élèves et les étudiants tunisiens. *Didaskalia*, *32*, 9-40.

Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, *14*, 47-61. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003

Puntambekar, S., & Hubscher, R. (2005). Tools for Scaffolding Students in a Complex Learning Environment: What Have We Gained and What Have We Missed? *Educational Psychologist*, *40*(1), 1-12. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4001_1

Puntambekar, S., & Kolodner, J. L. (2005). Toward implementing distributed scaffolding: Helping students learn science from design. *Journal of Research in Science Teaching*, *42*(2), 185-217. https://doi.org/10.1002/tea.20048

Quintana, C., Reiser, B. J., Davis, E. A., Krajcik, J., Fretz, E., Duncan, R. G., Kyza, E., Edelson, D., & Soloway, E. (2004). A Scaffolding Design Framework for Software to Support Science Inquiry. *The Journal of the Learning Sciences*, *13*(3), 337-386. JSTOR.

Reiser, B. J. (2004). Scaffolding Complex Learning: The Mechanisms of Structuring and Problematizing Student Work. *Journal of the Learning Sciences*, *13*(3), 273-304. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303_2

Richoux, H., & Beaufils, D. (2005). Conception de travaux pratiques par les enseignants : Analyse de quelques exemples de physique en termes de transposition didactique. *Didaskalia*, *27*, 11-39.

Rocard, M. (2007). *Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe.* Brussels: European Commission. Retrieved from http://ec.europa.eu/research/science-society/ document_library/pdf_06/report-rocard-onscience- education_en.pdf.

Roll, I., Baker, R. S. J. d, Aleven, V., & Koedinger, K. R. (2014). On the Benefits of Seeking (and Avoiding) Help in Online Problem-Solving Environments. *Journal of the Learning Sciences*, *23*(4), 537-560. https://doi.org/10.1080/10508406.2014.883977

Ryoo, K., & Linn, M. C. (2016). Designing automated guidance for concept diagrams in inquiry instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, *53*(7), 1003-1035.

Saavedra, R. (2015). *Etayer le travail des élèves avec la plateforme LabBook pour donner davantage de sens aux activités expérimentales réalisées par des élèves de première S.* [Thèse]. Université Grenoble Alpes.

Schwendimann, B. A., Rodríguez-Triana, M. J., Vozniuk, A., Prieto, L. P., Boroujeni, M. S., Holzer, A., Gillet, D., & Dillenbourg, P. (2017). Perceiving Learning at a Glance: A Systematic Literature Review of Learning Dashboard Research. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *10*(1), 30-41. https://doi.org/10.1109/TLT.2016.2599522

Sedrakyan, G., Mannens, E., & Verbert, K. (2019). Guiding the choice of learning dashboard visualizations: Linking dashboard design and data visualization concepts. *Journal of Computer Languages*, *50*, 19-38. https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2018.11.002

Séré, M. G. (2002). Towards renewed research questions from the outcomes of the European project labwork in science education. *Science Education*, *86*(5), 625-643.

Séré, M. G., & Beney, M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des experiences : Observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique. *Didaskalia*, *11*, 75-102.

Sheppard, K. (2006). High school students' understanding of titrations and related acid-base phenomena. *Chemistry Education Research and Practice*, *7*(1), 32-45. https://doi.org/10.1039/B5RP90014J

Shneiderman, B. (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*. https://doi.org/10.1109/VL.1996.545307

Shute, V. J. (2008). Focus on Formative Feedback. *Review of Educational Research*, *78*(1), 153-189. https://doi.org/10.3102/0034654307313795

Supatmi, S., Setiawan, A., & Rahmawati, Y. (2019). Students' misconceptions of acid-base titration assessments using a two—Tier multiple-choice diagnostic test. *African Journal of Chemical Education*, *9*(1). https://www.ajol.info/index.php/ajce/article/view/183074

Tchounikine, P., & Tricot, A. (2011). Environnements informatiques et apprentissages humains. In D. K. Catherine Garbay (Éd.), *Informatique et sciences cognitives : Influences ou confluence ?* (p. 153-186). OPHRYS / MSH. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00742999

Tharp, R. G., & Gallimore, R. (1988). *Rousing minds to life: Teaching, learning, and schooling in social context* (p. xii, 317). Cambridge University Press.

Tiberghien, A., Vince, J., & Gaidioz, P. (2009). Design-based research: Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, *31*(17), 2275-2314. https://doi.org/10.1080/09500690902874894

Vaessen, B. E., Prins, F. J., & Jeuring, J. (2014). University students' achievement goals and help-seeking strategies in an intelligent tutoring system. *Computers & Education*, *72*, 196-208. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.11.001

van de Pol, J., Volman, M., & Beishuizen, J. (2010). Scaffolding in Teacher–Student Interaction: A Decade of Research. *Educational Psychology Review*, *22*(3), 271-296. https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6

van der Kleij, F. M., Eggen, T. J. H. M., Timmers, C. F., & Veldkamp, B. P. (2012). Effects of feedback in a computer-based assessment for learning. *Computers & Education*, *58*(1), 263-272. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.020

VanLehn, K. (2011). The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems. *Educational Psychologist*, *46*(4), 197-221. https://doi.org/10.1080/00461520.2011.611369

van Riesen, S. A. N., Gijlers, H., Anjewierden, A., & de Jong, T. (2018). The influence of prior knowledge on experiment design guidance in a science inquiry context. *International Journal of Science Education*, *0*(0), 1-18. https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1477263

Verbert, K., Ochoa, X., De Croon, R., Dourado, R. A., & De Laet, T. (2020). Learning analytics dashboards: The past, the present and the future. *Proceedings of the Tenth International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, 35-40. https://doi.org/10.1145/3375462.3375504

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press. https://www.jstor.org/stable/j.ctvjf9vz4

Wajeman, C., Girault, I., d'Ham, C., & Marzin, P. (2015). Students' reflection on experimental design during an innovative teachning sequence with LabBook. *ESERA Conference*.

Wajeman, C., Girault, I., Hoffmann, C., Planche, M., Mandran, N., & d'Ham, C. (2021). Guider l'enseignement d'une démarche expérimentale avec un environnement informatique : Étude de cas en école d'ingénieur. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *24*, 161-183.

Widarti, H. R., Permanasari, A., & Mulyani, S. (2017). Students' Misconceptions on Titration. *J. Phys.: Conf. Ser.*, *812*(012016).

Wood, D., Bruner, J. S., & Ross, G. (1976). The Role of Tutoring in Problem Solving. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *17*(2), 89-100. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x

Xenofontos, N., Zacharia, Z., & Hovardas, T. (2018). How Much Guidance Students Need When Designing Experiments in a Computer-Supported Inquiry Learning Environment? *International Journal of Learning and Teaching*, 20-24. https://doi.org/10.18178/ijlt.4.1.20-24

Yang, H.-G., & Park, J. (2017). Identifying and applying factors considered important in students' experimental design in scientific open inquiry. *Journal of Baltic Science Education*, *16*(6), 932-945.

Zacharia, Z. C., Manoli, C., Xenofontos, N., de Jong, T., Pedaste, M., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Mäeots, M., Siiman, L., & Tsourlidaki, E. (2015). Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science: A literature review. *Educational Technology Research and Development*, *63*(2), 257-302. https://doi.org/10.1007/s11423-015-9370-0

Annexes

Annexe 1 : Praxis de manipulation de l'expérience de titrage proposée dans TitrAB et types de tâche de conception associées

Types de tâche de manipulation	Type de tâche de conception (dans TitrAB)
Préparer par dilution un volume V_D de solution S_D de concentration C' à partir d'une solution mère S_M de concentration C τ_m : - T_{m1} Rincer la verrerie de prélèvement (type G_P ; volume V_P) avec la solution à diluer S_M - T_{m2} Rincer la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C) avec le solvant s - T_{m3} Prélever le volume V_M de la solution à diluer S_M avec la verrerie de prélèvement (G_P, V_P) - T_{m4} Délivrer la solution prélevée (V_M) dans la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C) - T_{m5} Compléter à V_D avec le solvant s dans la verrerie de préparation de la dilution (G_C ; V_C) - T_{m6} Mélanger la solution S_D	Décider de diluer la solution titrée (ou titrante). * • Choisir la ou les valeur(s) possible(s) pour le volume de la prise d'essai ($V_{prise\ d'essai}$) à partir du matériel disponible. • Calculer la valeur approximative du volume de solution titrante versée à l'équivalence (V_E ou $V_{équivalent\ approx}$) pour chaque volume de prise d'essai choisi à l'étape précédente • Estimer si la valeur V_E approx est compatible avec le volume de la burette
	Déterminer le facteur de dilution de la solution à diluer (en sachant quel matériel est disponible) • Calculez les facteurs de dilution F_i possibles avec le matériel disponible, à partir de la verrerie de prélèvement et de la verrerie de préparation de la dilution disponibles • Calculer la valeur approximative du volume de solution titrante versée à l'équivalence V_E approx., si on applique ces dilutions • Choisir une dilution telle que la valeur V_E approx.′ soit comprise entre 8 mL et 20 mL.
	Choisir les paramètres de la tâche de manipulation associée τ_m • Choisir la nature S_M de la solution à prélever • Choisir le volume V_D de la solution à préparer par dilution • Choisir le volume V_M de la solution S_M • Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_M • Choisir le volume V_P de la verrerie G_P utilisée pour prélever S_M • Choisir le type de verrerie G_C pour préparer la solution fille • Choisir le volume V_C de la verrerie G_C pour préparer la solution fille • Choisir le solvant de dilution s
Remplir la burette graduée avec une solution	• Choisir la nature de la solution à mettre dans la burette
Prélever le volume V_T de la solution titrée S_D (ou S_M) avec la verrerie de prélèvement (G_P, V_P)	Choisir les paramètres de la tâche de manipulation associée • Choisir la nature S_D (ou S_M) de la solution à prélever • Choisir le volume V_D (ou V_M) de la solution S_D (ou S_M) • Choisir le type de verrerie G_P utilisé pour prélever S_D (ou S_M) • Choisir le volume de la verrerie V_P
Ajuster le volume de la solution titrée contenue dans le bécher (afin d'immerger les électrodes)	Décider la nécessite du type de tâches de manipulation et éventuellement choisir les paramètres de la tâche de manipulation associée • Décider d'ajouter une solution pour immerger les électrodes dans la solution titrée • Choisir le volume de solution ajoutée pour immerger les électrodes • Choisir la nature de la solution ajoutée pour immerger les électrodes • Choisir le matériel pour prélever la solution servant à immerger les électrodes

* Plusieurs techniques sont possibles. La technique décrite est une méthode systématique qui permet d'élaborer n'importe quel protocole de titrage. Avec l'habitude, l'élève pourra élaborer ses propres méthodes, moins systématiques, mais plus efficaces.

Il existe une différence entre les Tc présentées dans cette annexe et la présentation faite dans le Tableau 4.

- Si on isole T_{m3} dans la réflexion (cf. le Tableau 4), il est logique de décrire la conception associée comme le choix de tous les paramètres de la tâche de manipulation (quatre paramètres conduisent à spécifier quatre T_C).
- En revanche, lorsque T_{m3} est présenté comme un ingrédient de la technique τ_m, les types de tâches de manipulation T_{m1} à T_{m6} sont reliés et font appel aux mêmes paramètres. Ainsi nous avons choisi de mettre une liste de Tc dans la troisième case du tableau qui s'adresse à l'ensemble des Tm (T_{m1} à T_{m6}) sans faire une correspondance directe.

Annexe 2 : Les 16 exercices proposés dans le logiciel TitrAB

Variables			V'2, V'3	V'4, V'5	V'4, V'6	V'4	V'1				
			Variables descriptives de la situation					Calculs utiles pour la résolution		Solution(s) au problème	
Niveau	**Exercice**	**Nature du réactif titré**	**Choix de solutions titrantes**	**Volumes (mL) des pipettes jaugées**	**Volumes (mL) des fioles jaugées**	**Volumes (mL) des éprouvettes**	**Rapport des concentrations $C_{titré}/C_{titrant}$ (1)**	**Volumes équivalents (mL) possibles sans dilution (1)**	**Facteurs de dilution possibles**	**Dilution à effectuer**	**Volume (mL) de la prise d'essai**
1	11	acide fort	-	20	-	100	1	20	-	-	20
	12	base forte	-	10	25	25 ; 50	1	10	2,5	-	10
	13	acide faible	1 acide & 1 base	1 ; 2	-	100	13	13 ; 26	-	-	1
	14	base faible	-	2 ; 20	50	50	5	10 ; 100	25 ; 2,5	-	2
2	21	base faible	-	10	100	25 ; 100	0,1	1	10	titrante / 10	10
	22	acide faible	1 acide & 1 base	1 ; 10	100	10 ; 50	0,09	0,09 ; 0,9	10 ; 100	titrante / 10 ou 100	10 ou 1
	23	acide fort	-	10 ; 50	100	50 ; 250	10	100 ; 500	10 ; 2	titrée / 10	10
	24	base forte	-	1 ; 5	100	50 ; 250	300	300 ; 1500	100 ; 20	titrée / 20 ou 100	1 ou 5
3	31	acide faible	-	5 ; 20	100	100	13	65 ; 260	20 ; 5	titrée / 20 ou 5	20 ou 5
	32	base forte	-	5 ; 50	50 ; 250	10 ; 100	10	50 ; 500	5 ; 10 ; 50	titrée / 5 ou 50	5 ou 50
	33	acide faible	1 acide & 1 base	2 ; 50	10 ; 250	25 ; 100	1	2 ; 50	5 ; 125	titrée / 5 ou titrante / 5	50 ou 2
	34	acide faible	2 bases	1 ; 2	10 ; 100	50	1	1 ; 2	5 ; 10 ; 50	-	-
							0,25	0,25 ; 0,5		titrante / 50	1
4	41	base forte	-	5 ; 10 ; 50	250	25 ; 100	5	25 ; 50 ; 250	5 ; 25 ; 50	titrée / 5 ou 25	10 ou 50
	42	base forte	2 acides	1 ; 10	50 ; 250	100	120	120 ; 1200	5 ; 25 ; 50 ; 250	-	-
							300	300 ; 3000		titrée / 25 ou 250	1 ou 10
	43	acide fort	-	5 ; 25 ; 50	20 ; 250	50	1,27	6,3 ; 32 ; 64	4 ; 5 ; 10 ; 50	titrée / 5	50
	44	acide fort	-	1 ; 2 ; 25	50 ; 250	10 ; 50	1,25	1,25 ; 2,5 ; 31	2 ; 10 ; 25 ; 50 ; 125 ; 250	titrée / 2 ou titrante / 10	25 ou 1

(1) *valeurs approximatives obtenues à l'aide des informations indiquées par le logiciel avant la réalisation du titrage*