Institutional Repository - Research Portal
Dépôt Institutionnel - Portail de la Recherche
researchportal.unamur.be
University of Namur

THESIS / THÈSE

DOCTEUR EN SCIENCES

Analyse de l'activité étudiante lors de séances de laboratoire de chimie

vers une compréhension des raisonnements adoptés lors de l'écriture de résultats expérimentaux et de l'acquisition des techniques de dilution et de titrage colorimétrique

Picron, Celine

Award date:
2020

Awarding institution:
Universite de Namur

Link to publication

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 05. Jul. 2025

UNIVERSITÉ DE NAMUR
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE CHIMIE
UNITÉ DE RECHERCHE EN DIDACTIQUE DE LA CHIMIE

Analyse de l'activité étudiante lors de séances de laboratoire de chimie : vers une compréhension des raisonnements adoptés lors de l'écriture de résultats expérimentaux et de l'acquisition des techniques de dilution et de titrage colorimétrique

Thèse présentée par
Céline Picron
en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences

COMPOSITION DU JURY :

Sephora Boucenna	Enseignant/chercheur (Université de Namur)	
Isabelle Girault	Maître de conférences (Université Grenoble Alpes)	
Bernard Leyh	Professeur (Université de Liège)	
Steve Lanners	Professeur (Université de Namur)	**Président**
Johan Wouters	Professeur (Université de Namur)	
Philippe Snauwaert	Professeur (Université de Namur)	**Promoteur**

Septembre 2020

Graphisme de couverture : © Presses universitaires de Namur

© Presses universitaires de Namur & Céline Picron
Rue Grandgagnage 19
B - 5000 Namur (Belgique)

Toute reproduction d'un extrait quelconque de ce livre, hors des limites restrictives prévues par la loi,par quelque procédé que ce soit, et notamment par photocopie ou scanner, est strictement interdite pour tous pays.
Imprimé en Belgique
ISBN : 978-2-39029-117-6
Dépôt légal: D/2020/1881/16

Analyse de l'activité étudiante lors de séances de laboratoire de chimie : vers une compréhension des raisonnements adoptés lors de l'écriture de résultats expérimentaux et de l'acquisition des techniques de dilution et de titrage colorimétrique

par Céline Picron

L'écriture de résultats expérimentaux avec une précision adéquate et l'acquisition de techniques de laboratoire sont deux objectifs dont la poursuite se fait au travers des activités expérimentales.

Il s'avère que le report de valeurs obtenues expérimentalement en tenant compte de l'incertitude des différents appareils de mesure et pièces de verrerie utilisés constitue souvent un problème pour des étudiants débutant des études dans un domaine scientifique. La transposition didactique dont sont issues certaines règles employées et engendrant une perte de sens de ces dernières, la croyance des étudiants qu'il existe une valeur « vraie », la différence de signification du chiffre « zéro » entre les sciences expérimentales et les mathématiques sont autant de difficultés ou d'obstacles auxquels ils doivent faire face. Un outil, construit en utilisant la méthodologie de l'ingénierie didactique, a été mis en place. Les tests effectués suite à sa mise en œuvre auprès des étudiants montrent pourtant que son impact est limité. D'autres facteurs n'ayant pas forcément de lien direct avec le savoir à enseigner peuvent également intervenir tels que l'influence de l'encadrant ou l'implication des étudiants dans leurs apprentissages.

L'acquisition de technicité en laboratoire est généralement mentionnée comme but à atteindre par les enseignants. Généralement, lors de la plupart des activités expérimentales, le protocole de la manipulation est entièrement fourni. Or, lorsque la procédure à employer est totalement décrite, les étudiants ont tendance à avoir pour visée l'obtention de résultats plutôt que l'appropriation de gestes techniques. Il est donc nécessaire de leur faire rédiger tout ou partie de cette procédure. Pourtant, lorsque les étudiants sont filmés en laboratoire, leur activité apparaît comme n'étant pas composée que de gestes techniques et de périodes de prise d'informations au travers de la lecture de la procédure ou de l'interaction avec d'autres personnes. Il y a aussi un grand nombre de gestes ou d'actes ne pouvant pas être identifiés comme faisant partie de la technique de laboratoire à proprement parler. Ces gestes ne font pas partie de la tâche telle que

reconnue institutionnellement. Il s'agit de gestes inutiles, de temps d'attente, d'inaction, d'observation, de moments d'organisation, de discussion sans lien avec la tâche à accomplir, … Il apparaît que certains de ces actes que l'on pourrait qualifier de « parasites » ont pourtant une fonction, ils poursuivent un but au même titre que les gestes techniques.

Mots-clés : Précision – Incertitude – Ingénierie didactique – Théorie anthropologique du didactique – Activité – Dilution – Titrage – Étudiants

Analysis of student activity during chemistry laboratory sessions: towards an understanding of the reasoning adopted during the writing of experimental results and the acquisition of dilution and colorimetric titration techniques

by Céline Picron

The writing of experimental results with adequate precision and the acquisition of laboratory techniques are two objectives which are pursued through experimental activities.

It turns out that the writing of values obtained experimentally taking into account the uncertainty of the different measuring instruments and glassware used is often a problem for students starting studies in a scientific field. The didactic transposition from which certain rules are originate and causing a loss of meaning of the latter, the students' belief that there is a « true » value, the difference in meaning of the number « zero » between experimental sciences and mathematics are all difficulties or obstacles they have to face. A tool, built using the methodology of didactic engineering, was implemented. However, the tests carried out following its implementation with students show that its impact is limited. Other factors which are not necessarily directly related to the knowledge to be taught may also intervene, such as the influence of the supervisor or the involvement of the students in their learning.

The acquisition of laboratory techniques is generally mentioned as a goal to be achieved by teachers. Generally, during most experimental activities, the manipulation protocol is fully provided. Nevertheless, when the procedure to be used is fully described, students aim to achieve results rather than the appropriation of technical gestures. It is therefore necessary to have them write all or part of this procedure. However, when the students are filmed in the laboratory, their activity appears to be not composed only of technical gestures and periods of information taking through the reading of the procedure or the interaction with other people. There are also a large number of gestures or acts which cannot be identified as part of the laboratory technique itself. These gestures are not part of the institutionally recognized task. These are unnecessary actions, waiting and inaction times, observation and organizational moments, discussion unrelated to the task,

… It appears that some of these acts that could be described as “parasitic” have a function. They pursue a goal in the same way as technical gestures.

Key words : Accuracy – Uncertainty – Didactic engineering – Anthropological theory of the didactic – Activity – Dilution – Titration – Students

Remerciements

Et voilà le dernier acte de cette thèse. Cette aventure a été très riche en rencontres, rebondissements, en moments de joie et de peine. Je n'y serais pas arrivée sans le soutien de nombreuses personnes qu'il est maintenant temps de remercier.

Commençons par les membres de l'équipe de recherche. Le premier d'entre eux est, bien entendu, le promoteur de cette thèse, le professeur Philippe Snauwaert. Sa grande bienveillance, sa gentillesse et sa disponibilité ont été d'une importance considérable lors des passages à vide inhérents à tout travail de recherche. Les discussions que nous avons eues et ses conseils ont été très formateurs et ont, la plupart du temps, mis au jour de nouvelles manières de voir les choses. Et je m'en voudrais de m'arrêter au cadre de la thèse, de ne pas mentionner son soutien indéfectible dans tous mes projets, tous ces moments plus conviviaux à l'occasion de repas ou d'événements qui représentent autant d'instants de lâcher prise permettant de rebondir, ces occasions qu'il ne manque jamais de jouer à St Nicolas ou au Père Noël, toutes ces discussions informelles, etc.

Ensuite, je me dois de remercier mon collègue direct, Jérémy Dehon. Ses conseils avisés à l'occasion de problèmes rencontrés allant de la connaissance des cadres théoriques au choix d'images et les conversations que nous avons pu avoir ont été d'une aide appréciable.

Un tout grand merci à Diane Baillieul pour ses qualités d'écoute lors de nos nombreux échanges, la possibilité qu'elle m'a laissée de transformer certaines séances d'exercices et la confiance qu'elle a pu me témoigner tout au long de ces années. Je remercie également Isabelle Ravet pour toute l'expérience qu'elle n'hésite pas à partager et à Sarah-Davina Pierard pour les nombreuses « Tea Times » du matin. Je me dois aussi de citer Elodie Fasbinder et Justine Simon qui ont toutes deux fait un travail formidable lors de leur mémoire respectif dans notre unité de recherche.

L'équipe de recherche n'est bien sûr pas la seule à remercier. Une rencontre a particulièrement marqué un tournant dans mon travail : celle de Sephora Boucenna. Je lui suis reconnaissante de m'avoir aidée à me plonger dans le cadre de la théorie de l'activité. Sans elle, il aurait été bien plus difficile d'en comprendre certains tenants et aboutissants. Sa collaboration lors de l'obtention des données nécessaires à cette recherche et son coup de pouce lors de leur analyse ont été inestimables. Dans le cadre de l'acquisition des données, elle n'a pas été seule. J'en profite donc pour remercier ses

étudiants inscrits en master de spécialisation en accompagnement des professionnels de l'éducation, du management, de l'action sociale et de la santé en 2018-2019.

Je suis également reconnaissante envers les chercheurs, confirmés ou non, que j'ai pu rencontrer et avec lesquels j'ai eu des échanges lors de soirées de conférences, de colloques, de journées d'échanges, … : Bénédicte, Jim, Maxime, Benoît, Marie, Hamad, Laureline, Vincent, etc.

Et il ne faudrait pas oublier les autres collègues présents dans les bons comme les mauvais moments : Sébastien, Christine, Brigitte, Thierry, Valérie, Bastien, Loïc J., Loïc C., Marine, Cassandra, Ali, Pierre, Marie, … toutes ces personnes qui ont, à un moment ou un autre joué le rôle de soutien, apporté une petite ou une grande aide ou m'offrir un moment de pause, une halte parfois bienvenue !

A ces personnes, je dois encore ajouter toutes celles qui ont participé à cette recherche non plus en tant que conseillers ou soutiens mais comme sujets. Parmi elles, il y a tous les encadrants de l'Université Catholique de Louvain, de l'Université de Namur, de la Haute École Louvain en Hainaut de Fleurus, de la Haute École de Namur-Liège-Luxembourg et de l'École Normale Catholique du Brabant Wallon ayant accepté de tester l'un des outils mis en place. Il y a également des étudiants inscrits en sciences pharmaceutiques ou biomédicales mais surtout en sciences chimiques qui ont acceptés d'être filmés, interrogés, …

J'en viens à remercier également les membres de mon comité d'accompagnement, qui ont toujours répondu présents lors de mes demandes d'aide et/ou de conseils, ainsi que ceux de mon jury de thèse pour les remarques et recommandations qu'ils ont faites et pour les échanges que nous avons eus en vue d'améliorer ce travail.

Enfin, je ne peux pas passer outre les personnes qui me soutiennent depuis de nombreuses années : mes parents Daniel et Janine discrets mais toujours présents quand le besoin se fait sentir, mon frère Xavier à l'humour parfois grinçant, parfois décalé et à la répartie facile, ma grand-mère Cécile à la recherche du vêtement qui siéra le mieux à sa petite fille et ma tante Marlène prête à tout moment à rendre service, … mais aussi mes plus proches amies Anne-Sylvie et Béatrice. Très à l'écoute de l'autre, Anne-Sylvie a toujours su dire le mot juste au bon moment pour me remonter le moral et me redonner du courage. Généreuse et prodigue en conseils, Béatrice est constamment présente en cas de besoin.

Table des matières

Table des matières 9
Chapitre 1 Introduction générale 17
Chapitre 2 Etat de l'art et cadres théoriques 23
1. Analyse des pratiques 24
1.1. La transposition didactique 24
1.2. La théorie anthropologique du didactique (TAD) 28
1.3. La théorie de l'activité 32
1.3.1. Origines et principes de la théorie 32
1.3.3. Utilisation de la théorie de l'activité 38
1.4. Articulation entre la théorie anthropologique du didactique et la théorie de l'activité 44
2. La transcription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate 49
2.1. La méthode experte 49
2.1.1. Incertitude 49
2.1.2. L'incertitude liée à un appareil de mesure 54
2.1.3. Propagation des incertitudes 56
2.1.4. Retranscription de résultats avec la précision adéquate… 60
2.2. Autres méthodes 62
2.3. Méthodes et difficultés des étudiants lors de la retranscription d'un résultat avec la précision adéquate 64
2.4. Les méthodes d'arrondi 69
3. Les techniques de laboratoire 72
3.1. La dilution 72
3.2. Le titrage colorimétrique 75
Chapitre 3 Questions de recherche 81
1. La retranscription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate 83
2. Les acquis techniques des étudiants lors d'une activité expérimentale 86
Chapitre 4 Méthodologie 89
1. La retranscription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate 90

1.1. Les analyses préalables 91
1.1.1. La légitimité du savoir 91
1.1.2. Détermination des difficultés étudiantes 91
1.1.3. Détermination des méthodes employées par les étudiants 98
1.2. La conception et l'analyse a priori 99
1.3. Expérimentation 102
1.4. Analyse a posteriori et validation 103
2. Les acquis techniques des étudiants lors d'une activité expérimentale 105
2.1. Organisation des séances de laboratoire 105
2.2. Analyse des protocoles expérimentaux rédigés par les étudiants 106
2.2.1. Les protocoles expérimentaux 106
2.2.2. Méthodologie d'analyse de la nature des éléments présents dans les protocoles 109
2.2.3. Méthodologie d'analyse du degré de détail des protocoles 112
2.3. Impact du protocole sur la tâche effective des étudiants lors des activités expérimentales 118
2.3.1. Aspects généraux 118
2.3.2. Adéquation entre la tâche décrite dans les protocoles rédigés et la tâche réalisée lors d'un TP impliquant la rédaction d'un protocole expérimental 122
2.3.3. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors de TP 123
2.3.4. Comparaison entre les tâches effectives réalisées lors d'un TP impliquant la rédaction d'un protocole (TP 4) et lors d'un TP pour lequel un protocole succinct est fourni (TP 5) 123
2.4. Analyse de l'activité des étudiants lors des activités expérimentales impliquant les techniques de dilution et de titrage 124
2.4.1. Activité des étudiants en laboratoire : catégorisation des actes 125
2.4.2. Détermination des ressources employées et des fonctions remplies par les différents actes 127
Chapitre 5 Analyses préalables 129
1. Légitimité du savoir 130

1.1. Les contraintes 130
1.2. La transposition didactique 131
2. Détermination des difficultés étudiantes 134
2.1. La séquence de cours 134
2.2. Impact de la séquence de cours : Etude préliminaire 135
2.3. Analyse de productions étudiantes 137
2.3.1. L'addition 137
2.3.2. La soustraction 139
2.3.3. La multiplication 141
2.3.4. La division 143
2.3.5. Le mélange de multiplication et de division 145
2.4. Test proposé aux étudiants 149
2.5. Détermination des méthodes employées par les étudiants 150
2.5.1. Catégorie 1 : L'utilisation de la règle inadéquate 150
2.5.2. Catégorie 2 : La redéfinition des règles par leur opposé 153
2.5.3. Catégorie 3 : La modification du sens du chiffre « zéro » 154
2.5.4. Catégorie 4 : Le traitement des nombres purs comme des valeurs expérimentales 157
2.5.5. Autres types d'erreurs rencontrées 158
2.5.6. Corrélation des erreurs commises par les étudiants 161
2.5.7. Etudiant ne commettant pas d'erreur 163
3. Synthèse 165
Chapitre 6 Conception et analyse a priori 167
1. Les variables macro-didactiques 168
1.1. Choix de l'outil 168
1.2. Choix pédagogiques 169
1.2.1. Etablir le contexte 169
1.2.2. Donner des explications pertinentes 170

1.2.3. Minimiser la charge cognitive 170
1.2.4. Engager les étudiants 171
1.2.5. Les activités 171
1.3. Utilité du dispositif 171
2. Les variables micro-didactiques 172
2.1. L'ordre des sujets 172
2.2. Choix didactiques 173
3. Analyse a priori : hypothèses sur l'origine des difficultés des étudiants 178
3.1. Catégorie 1 : L'inversion des règles 178
3.2. Catégorie 2 : La redéfinition des règles par leur opposé 178
3.3. Catégorie 3 : Le manque de signification du « zéro » 179
3.4. Catégorie 4 : L'influence des nombres purs 180
3.5. Autres types d'erreur 180
4. Construction d'un outil 181
4.1. Fiche technique 1 : Vocabulaire lié au laboratoire 183
4.2. Vidéo 1 : Mesures et incertitudes 187
4.3. Fiche technique 2 : Comment arrondir correctement un nombre ? 193
4.4. Vidéo 2 : Précision des résultats lors d'opérations d'addition et de soustraction 194
4.5. Vidéo 3 : Les chiffres significatifs 200
4.6. Vidéo 4 : Précision des résultats lors d'opérations de multiplication et de division 204
4.7. Vidéo 5 : Les nombres purs et constantes 208
4.8. Vidéo 6 : Méthode de résolution 213
4.9. Accès à la séquence de cours 218
5. Synthèse 220
Chapitre 7 Expérimentation et analyse a posteriori 223
1. Utilisation de la séquence de cours par les étudiants 224
2. Classement des erreurs dans les catégories 225

2.1. Identification des erreurs 225
2.2. Catégorisation des erreurs commises 226
3. Résultats 234
3.1. Impact du cours en ligne sur les erreurs commises lors de chacune des opérations 235
3.1.1. Erreurs commises sur le long terme : comparaison des rapports et des tests 235
3.1.2. Impact direct du cours en ligne : analyse des rapports 237
3.1.3. Impact du cours en ligne à long terme : analyse des tests 238
3.1.4. Conclusion 239
3.2. Impact du cours en ligne sur les types d'erreurs commises 240
3.2.1. Types d'erreurs commises sur le long terme : comparaison des rapports et des tests 240
3.2.2. Impact direct du cours en ligne : analyse des rapports 242
3.2.3. Impact du cours en ligne à long terme : analyse des tests 244
3.2.4. Conclusion 245
3.3. Impact du cours en ligne sur la fréquence des erreurs commises dans chaque catégorie 246
3.3.1. Catégorie 1 : Utilisation de la règle inadéquate 246
3.3.2. Catégorie 2 : Redéfinition des règles par leur opposé 249
3.3.3. Catégorie 3 : Modification du sens du chiffre « zéro » 251
3.3.4. Conclusion 253
3.4. Conclusion : impact du cours en ligne 253
Chapitre 8 Validation 255
Chapitre 9 Analyse des protocoles de laboratoire rédigés par les étudiants 259
1. Contenu des protocoles 261
2. Analyse de la nature des éléments présents dans les protocoles expérimentaux 262
2.1. Analyse praxéologique 263

2.2. Evolution au cours de l'année académique 265
3. Analyse du degré de détail des protocoles expérimentaux 266
3.1. Niveau d'explicitation des protocoles 272
3.2. Evolution au cours de l'année académique 273
4. Synthèse 276
Chapitre 10 Impact du protocole sur la tâche effective des étudiants lors d'activités expérimentales 281
1. Analyses liées à la tâche réalisée lors du TP 4 impliquant la rédaction du protocole expérimental 283
1.1. La tâche effective réalisée par les étudiants lors du TP 4 283
1.2. Adéquation entre la tâche décrite dans les protocoles rédigés et la tâche réalisée lors du TP 4 286
1.3. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors du TP 4 290
2. Analyses liées à la tâche réalisée lors du TP 5 dont le protocole est fourni 293
2.1. La tâche effective réalisée par les étudiants lors du TP 5 293
2.2. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors du TP 5 296
3. Comparaison des tâches effectives lors des deux TP impliquant une dilution et un titrage (TP 4 et 5) 298
4. Synthèse 301
Chapitre 11 Activité des étudiants en laboratoire 305
1. Catégorisation des actes des étudiants en laboratoire 307
1.1. TP impliquant la rédaction du protocole expérimental (TP 4) 307
1.2. TP pour lequel le protocole expérimental est fourni (TP 5) 311
1.3. Comparaison des proportions des catégories de gestes lors des deux TP de première année 313
1.4. TP de deuxième année (TP acide ascorbique) 315
1.5. Comparaison des proportions des catégories de gestes lors des TP de première et de deuxième année 319
2. Les ressources employées par les étudiants 320
2.1. Les entretiens d'autoconfrontation 320

2.2. Les ressources évoquées par les étudiants lors des entretiens 322
2.3. Mise en tension des ressources 326
3. Les fonctions remplies par les actes que les étudiants réalisent en laboratoire 327
3.1. L'agir non étayé 328
3.2. L'agir étayé 331
3.3. La régulation 334
3.4. La planification 335
3.5. Le curseur temporel 337
3.6. Le support à l'investigation 338
3.7. La conformité 340
3.8. L'économie gestuelle 344
3.9. La balise 345
3.10. L'apprentissage 346
3.11. L'appel à l'encadrant ou aux pairs évité 346
3.12. L'obtention d'informations par d'autres canaux 347
3.13. Le respect des normes de laboratoire 348
3.14. Le gaspillage évité 349
3.15. La mise en suspens de la tâche 349
3.16. Résumé des fonctions 350
4. Fonctions des actes posés par les étudiants 352
4.1. Fonctions remplies par les référents 352
4.2. Fonctions des différentes catégories de gestes 355
4.2.1. Fonctions remplies par les gestes techniques 357
4.2.2. Fonctions remplies par les gestes parasites 360
5. Synthèse 365
Chapitre 12 Conclusion générale 369
Bibliographie 377

Chapitre 1
Introduction générale

Les activités expérimentales, aussi appelées séances de travaux pratiques (TP) ou séance de laboratoire sont développées pour permettre aux étudiants de s'approprier de multiples acquis, comme reporté dans divers articles (Giuseppin, 1996; Hofstein & Lunetta, 2004; Lloyd, 1992; National Research Council, 2006; Pernot, 1993; Reid & Shah, 2007). Ces acquis peuvent être classés suivant quatre catégories en fonction des objectifs définis (Reid & Shah, 2007) :

- les objectifs théoriques liés à l'apprentissage des concepts, principes, théories, … Il s'agit de vérifier une théorie vue au cours, de comprendre et d'analyser des modèles, de construire du savoir et des connaissances, de découvrir de nouveaux concepts, de donner du sens aux concepts, …
- les objectifs techniques liés à l'utilisation des produits et du matériel de laboratoire. Utiliser les différentes techniques de laboratoire, manipuler des produits chimiques et les pièces de verrerie, connaître les règles de sécurité au laboratoire, évaluer le risque lié à la toxicité des produits utilisés, … sont des apprentissages spécifiques à la discipline.
- les objectifs scientifiques liés à l'activité tels que se poser des questions, formuler des hypothèses, construire un mode opératoire, analyser des données, rédiger un rapport de laboratoire, …
- les objectifs transversaux comme le fait de travailler en équipe, gérer son temps, développer la créativité, l'imagination, acquérir de l'autonomie, …

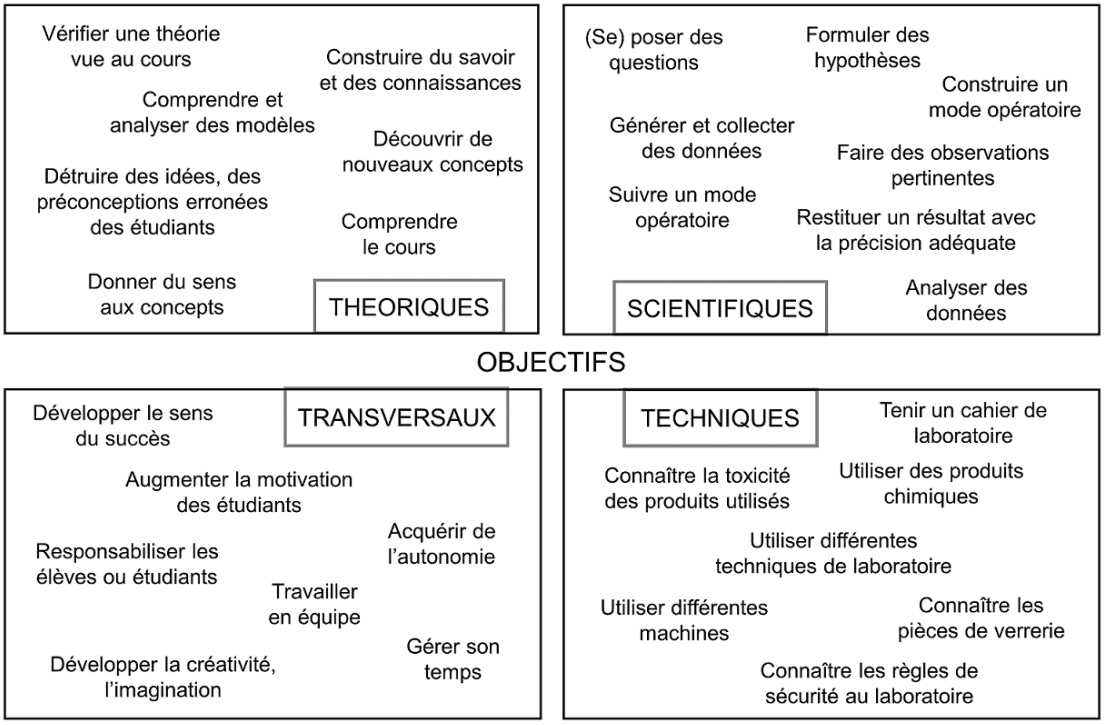


Figure 1 : Objectifs pouvant être poursuivis au travers d'activités expérimentales en laboratoire

La figure 1 reprend un classement de ces différents objectifs. Cette liste est bien entendu non exhaustive.

L'atteinte de ces objectifs dépend fortement de la manière dont sont organisées les activités expérimentales. Selon Domin (1999), il existe quatre styles de laboratoire pouvant être différenciés à l'aide de trois descripteurs (le résultat, l'approche et la procédure) présentés dans le tableau 1. Ce dernier décrit succinctement des modalités d'enseignement des différents types d'activités expérimentales existantes. Lors d'une séance de laboratoire, il est bien entendu possible de combiner plusieurs styles en fonction des objectifs d'enseignement poursuivis.

Entrée	**Style**	**Descripteurs**		
		Résultat	**Approche**	**Procédure**
1	Vérification	Prédéterminé	Déductive	Donnée
2	Basé sur un problème	Prédéterminé	Déductive	Générée par l'étudiant
3	Découverte	Prédéterminé	Inductive	Partiellement générée par l'étudiant
4	Enquête	Non déterminée	Inductive	Générée par l'étudiant

Tableau 1 : Descripteurs des différents styles de laboratoire *(d'après Domin, 1999)*

La plupart des activités expérimentales mises en place en première année de bachelier universitaire permettent d'illustrer une théorie, un modèle ou un principe vu au cours théorique (Lagowski, 2002; Pernot, 1993; Tsaparlis & Gorezi, 2007) en utilisant quelques techniques de base. Les étudiants sont amenés à suivre une procédure de laboratoire précise détaillant point par point les actions à réaliser. Ce type de séance de laboratoire est dit de vérification (Tableau 1, entrée 1) (Domin, 1999). Les étudiants y font des observations, analysent leurs données et utilisent ce qu'ils ont vus au cours pour expliquer le phénomène observé ou les résultats obtenus. Malgré les avantages qu'il présente tels que la possibilité de se donner à un grand nombre d'étudiants de manière sécurisée sur un période de temps ne dépassant pas 3h ou encore son coût réduit, ce système ne laisse que peu de place aux apprentissages (Hofstein & Lunetta, 2004). Le rôle de l'encadrant devrait alors être de questionner les étudiants sur leur compréhension de la matière en lien avec le TP, de les faire réfléchir sur leurs pratiques.

Dans les autres styles de séance de laboratoire, le rôle de l'encadrant est encore plus important du fait que l'étudiant n'aura pas toujours sous la main le support théorique et/ou technique adéquat.

Au niveau du style de séance de laboratoire basé sur un problème (Tableau 1, entrée 2), l'étudiant doit utiliser ce qui a été vu en cours pour construire sa propre procédure de laboratoire dans le cadre de la résolution d'un problème dont le résultat n'est connu que par l'encadrant. Le but n'est pas de découvrir de nouveaux concepts mais d'appliquer une ou plusieurs théories vues au cours pour résoudre un problème (Domin, 1999; Golde, McCreary, & Koeske, 2006; Lagowski, 2002).

Les séances de laboratoire de découverte (Tableau 1, entrée 3) fonctionnent sur base d'une question posée par l'encadrant. La procédure de laboratoire est ensuite construite par les étudiants, guidés à l'aide de questions et de remarques de l'encadrant. L'objectif de l'activité est alors d'obtenir et d'analyser les résultats de manière à découvrir une nouvelle matière, un nouveau concept, … et la conduite d'une recherche expérimentale (Domin, 1999; Lagowski, 2002).

Dans la séance de laboratoire d'enquête (Tableau 1, entrée 4), l'encadrant donne quelques informations à partir desquelles l'étudiant formule la question sur laquelle il va travailler. Il doit alors construire sa propre procédure de laboratoire, au besoin avec l'aide de l'encadrant ou d'articles et, ensuite, générer et analyser ses résultats. Dans ce cas, personne ne connait encore le résultat, la question pouvant être différente pour chacun des étudiants (Domin, 1999; Lagowski, 2002; National Research Council, 1996).

Les séances de laboratoire basés sur un problème et de type enquête nécessitent d'avoir déjà un certain nombre d'acquis tant théoriques que procéduraux dans le domaine scientifique appliqué. Ils ne sont donc pas les plus adéquats en début d'apprentissage.

Dans un article traitant d'une étude des tâches effectuées en laboratoire de biologie, de chimie et de physique dans différents pays européens, Tiberghien et al. (2001) écrivent « *it appears that for all disciplines labwork tasks more frequently ask students "to identify objets and phenomena" than "to learn a theory/model"* » ou encore « … *the labsheet is the explicit and formal means used by the teacher to tell them what they have to do during a labwork session, to regulate the time of the class during labwork activities, and thus to keep it under control* ». Ces deux phrases laissent entendre que la majorité des séances de laboratoire sont de style « vérification ». Cet article mentionne également que certaines différences apparaissent en fonction des disciplines d'enseignement. En physique, les étudiants sont plus amenés à récolter des données pour les analyser et, en chimie, à apprendre comment réaliser des procédures qualifiées de « standards ». Mais qu'en est-il réellement des acquis ? Les étudiants apprennent-ils

effectivement à reporter les données et les résultats générés de manière adéquate ? Parviennent-ils à acquérir certaines de ces procédures standards ? Le style de laboratoire est-il adapté dans le cadre de ces deux types d'apprentissages ?

Dans le cadre de cette thèse, je me suis donc intéressée à ces deux acquis particulièrement spécifiques aux activités expérimentales : la retranscription de résultats avec la précision adéquate et l'acquisition de compétences techniques. Cet écrit comporte donc deux parties, chacune s'intéressant à l'un de ces deux thèmes.

Le thème de la retranscription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate nécessite de s'intéresser aux différentes méthodes employées de la plus experte à celles qui sont employées en début d'apprentissage. Le but est de déterminer les transformations subies par le savoir pour être rendu enseignable. En effet, la plupart de ces méthodes sont issues de transpositions didactiques. A l'Université de Namur, la méthode employée implique l'utilisation de règles d'écriture des résultats qui sont fonction des opérations mathématiques. On peut alors se poser la question de l'impact sur la perception et la compréhension que les étudiants ont du savoir qui leur est enseigné et sur la manière dont ils l'appliquent lors des prises de mesures et du report des données et résultats.

En ce qui concerne plus particulièrement les procédures standards, la question qui se pose porte sur leur assimilation. Séré (2002) rapporte que, lorsque la procédure est totalement décrite, l'objectif des étudiants est orienté vers l'obtention des données plutôt que vers la compréhension des gestes réalisés. Il serait alors nécessaire, pour les étudiants, de répéter les gestes pour engendrer un apprentissage. Malheureusement, les apports d'une simple itération des techniques sans appui théorique est rarement efficace, notamment sur le long terme. L'idée serait alors de changer la méthodologie d'enseignement des techniques de laboratoire pour que leur acquisition devienne un but à atteindre aux yeux des étudiants. Dans ce cadre, il est indispensable de les engager dans des activités durant lesquelles il leur est demandé un travail ou une réflexion sur les procédures à appliquer lors de l'emploi de ces techniques. Une manière de faire serait de les amener à concevoir le protocole par eux-mêmes. Cependant, les étudiants ne connaissent pas les gestes à réaliser, l'apprentissage se voulant essentiellement technique. Il est donc nécessaire de prévoir les outils permettant cet apprentissage. Ces outils devront mentionner les gestes à réaliser mais également fournir les justifications, les raisons de ces gestes. Nous pensons en effet qu'il est inconcevable de construire un ensemble d'outils qui ne ferait que présenter les gestes à effectuer sans faire de lien avec la théorie associée. Cet ensemble d'outils doit présenter les raisons à la fois de la technique de laboratoire et de chacun des actes la composant. Les étudiants ont alors

l’occasion de construire le protocole de la manipulation à réaliser en connaissant la logique sous-tendant chacun des actes pour la mener à bien. Cela est-il suffisant pour engendrer des acquis techniques ? Qu’apprennent et retiennent les étudiants d’un point de vue technique lorsqu’ils appliquent une procédure qu’ils ont eux-mêmes écrite ? Quel est l’impact de cette méthodologie par la suite ?

Juger de l’acquisition de compétences techniques implique d’observer les étudiants lorsqu’ils sont amenés à réaliser des gestes techniques propres aux activités de laboratoire. La construction des outils mentionnés précédemment et l’analyse de l’activité des étudiants en laboratoire impliquent, tout comme pour le sujet précédent, de s’intéresser à la technique telle que prescrite.

Les deux sujets nécessitent de s’intéresser à des pratiques et à les analyser. Pour cela, divers cadres théoriques sont employés dont la théorie anthropologique du didactique étendue au cadre T4TEL et la théorie de l’activité.

Chapitre 2
Etat de l’art et cadres théoriques

1. Analyse des pratiques

1.1. La transposition didactique

Comme mentionné dans l'introduction, le savoir subit des transformations pour être rendu enseignable. Ce processus de transformation est appelé la transposition didactique.

C'est en 1975 que Verret en vient à parler pour la première fois de transposition didactique alors qu'il étudie la façon de préparer les savoirs pour les rendre enseignables (Cohen-Azria, Daunay, Delcambre, & Lahanier-Reuter, 2013; Perrenoud, 1998). Dans les années 80, Chevallard reprend l'idée de Verret : « *Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre sa place parmi les objets d'enseignement. Le « travail » qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la « transposition didactique* ». (Chevallard & Johsua, 1991, p.39)

Les transformations que subit le savoir sont dues à diverses contraintes liées au système d'enseignement. La première de ces contraintes rend compte du besoin d'enseigner des notions dans un but d'acquisition. Elles doivent donc être présentées une à une. C'est la désyncrétisation du savoir. Le savoir est morcelé en savoirs partiels qui sont présentés comme autonomes. Ainsi, dans l'enseignement secondaire, les sciences sont subdivisées en biologie, chimie, géologie, mathématiques et physique. Ces savoirs partiels sont présentés les uns après les autres, séparément, sans forcément faire de liens. Par exemple, dans l'enseignement secondaire belge, la loi des gaz parfaits sera utilisée dans le cours de chimie pour déterminer le volume molaire gazeux dans les conditions normales de température et de pression et, la même année, la loi de Charles, qui établit qu'à pression constante le volume d'un gaz est directement proportionnel à la température, est utilisée dans le cadre du cours de physique pour déterminer le zéro absolu de température à une pression donnée (Adnet et al., 2014). A aucun moment il n'est proposé de montrer le lien entre la loi de Charles et la loi des gaz parfaits.

La deuxième contrainte engendrant une transformation du savoir est la dépersonnalisation. Lors de l'enseignement, les personnes ayant mis au point le savoir ainsi que les conditions d'apparition de ce savoir ne sont que rarement citées. Les erreurs, les réflexions, les idées, … des personnes ayant mis au point le savoir sont supprimées. Un exemple de cette dépersonnalisation du savoir en chimie est le nombre d'Avogadro. Ce nombre est utilisé dans l'enseignement pour définir la mole. Il est alors possible de croire que ce nombre a été déterminé par Amedeo Avogadro alors qu'il travaillait sur cette

notion. En réalité, la notion de mole n'existait pas et le concept d'atome n'était pas encore accepté par la communauté scientifique de l'époque. C'est sur ce concept que travaillait Avogadro lorsqu'il a émis son hypothèse « *Dans les mêmes conditions de température et de pression, des volumes égaux de gaz renferment le même nombre d'entités* » (Wouters, 2015, p.36). Ce nombre a été déterminé par un physicien nommé Jean Perrin qui lui a donné le nom d'Avogadro (Bensaude-Vincent & Stengers, 1995).

La troisième contrainte est la programmabilité de l'acquisition du savoir. Pour être enseignés, les savoirs doivent être acquis progressivement. Les savoirs à enseigner doivent donc être déterminés et planifiés. Ils le sont au travers de programmes et de référentiels. Les notions et concepts y sont présentés dans un ordre précis souvent très différent de l'ordre de découverte. Ces programmes indiquent aussi une durée à consacrer à l'enseignement d'un thème ou d'un point de matière. Une fois mis au point, ces programmes sont publiés et peuvent donc être consultés. Ces écrits sont publics et transforment le savoir à transmettre en savoir à connaître. Une vérification des connaissances est faite au moyen d'évaluations, d'épreuves internes (par le professeur) ou externes (par une institution externe à l'école). Il doit y avoir un contrôle de l'acquisition du savoir.

Du fait de ces contraintes, le savoir dit savant subit diverses transformations avant de devenir un sujet d'enseignement. Cependant, le savoir enseigné doit rester suffisamment proche du savoir savant sous peine de ne pas être reconnu par des experts dans le domaine d'étude de ce savoir. Il n'aurait alors aucune légitimité. Dans un même temps, ce savoir transformé doit être suffisamment éloigné du savoir banalisé, du savoir acquis par une majorité des membres de la société incluant les parents. Dans le cas contraire se poserait la légitimité de l'enseignement de ce savoir. En effet, quel rôle jouerait alors l'enseignant s'il ne faisait que transmettre ce que les parents ou n'importe quel membre de la société pourrait transmettre ? Il y a donc un juste milieu à trouver entre le savoir dit savant et le savoir banalisé. Ce juste milieu change évidemment avec le temps, le savoir banalisé se rapprochant du savoir enseigné. Il est alors nécessaire de repenser le savoir à enseigner en repartant du savoir savant (Chevallard & Johsua, 1991). La lecture et l'écriture sont des exemples de savoirs enseignés qui sont devenus des savoirs banalisés au cours du temps. En effet, dans le passé, tout le monde ne savait pas lire et écrire. Seules les personnes considérées comme faisant partie d'une élite acquéraient ces compétences. Actuellement, ces dernières sont acquises par une grande majorité des membres de la société. L'enseignement ne peut donc plus s'arrêter à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture mais doit se complexifier. Il doit changer pour correspondre aux attentes de la société.

Une première série de transformations vont permettre de passer du « savoir savant » au « savoir à enseigner ». Ces transformations font partie de ce qui a été appelé « transposition didactique externe ». Une série d'experts du savoir savant sélectionne les sujets à enseigner, prescrit un ordre d'acquisition des différentes notions liées à ces sujets et signale un niveau à atteindre. Ces experts publient ce qu'ils considèrent comme « savoir à enseigner » dans des programmes et référentiels d'une part, et des manuels scolaires, guides méthodologiques, … d'autre part. Ces productions sont donc le fruit de la transposition didactique externe. Au cours de cette dernière, le savoir savant subit diverses transformations dont, par exemple, la simplification du modèle de référence, l'introduction de nouveaux termes permettant de rendre les contenus à apprendre accessibles, la mise en place d'analogies, d'images, … pour favoriser la compréhension d'éléments plus abstraits, … Il arrive aussi que de nouveaux objets soient créés dans un but didactique comme, par exemple, la notion de chiffre significatif utilisée dans les règles à appliquer pour reporter le résultat d'une multiplication ou division avec une précision adéquate et dont il sera fait mention par la suite. Ces transformations sont essentiellement dues à un processus de décontextualisation et de recontextualisation. Un chercheur, lorsqu'il mène sa recherche, opère dans un contexte bien particulier qui est généralement non transposable à l'enseignement. Le savoir produit par ce chercheur, pour être enseigné, doit être décontextualisé pour être replacé dans un contexte nouveau, celui de l'enseignement.

Une seconde série de transformations permettent de passer du « savoir à enseigner » au « savoir enseigné ». L'ensemble de ces transformations forment la « transposition didactique interne ». Le savoir à enseigner est modifié par l'enseignant à cause de sa formation, son vécu, la manière dont il perçoit le contenu à enseigner, l'établissement dans lequel il enseigne, les interactions qu'il a avec ses collègues, avec ses élèves, … mais ce savoir est aussi modifié par les élèves eux-mêmes du fait de leur temps de compréhension, de leurs conceptions préalables, … Ainsi, tout comme le « savoir à enseigner » se différencie du « savoir savant », le « savoir enseigné » se différencie du « savoir à enseigner ». Les modifications subies sont dues non seulement à l'interprétation des programmes et référentiels par l'enseignant, à l'utilisation qu'il a des autres produits issus de la transposition didactique externe et à la reconstruction qu'il fait pour produire le cours mais aussi à la façon dont se déroule ce cours, à la relation existante entre l'enseignant et ses élèves. Un même cours sur papier ne sera pas donné de la même manière à deux groupes d'élèves distincts car les interactions entre l'enseignant et les élèves seront différentes.

Ainsi, la transposition didactique présente deux processus de transformations, un externe et un interne, engendrant une modification du savoir savant. Cette modification n'est pas à voir comme une dénaturation ou une simplification du savoir mais comme une adaptation nécessaire à la transmission de ce savoir (Chevallard, 1982; Paun, 2006; Perrenoud, 1998; Philippe, 2004).
La figure 2 présente le principe général de la transposition didactique.

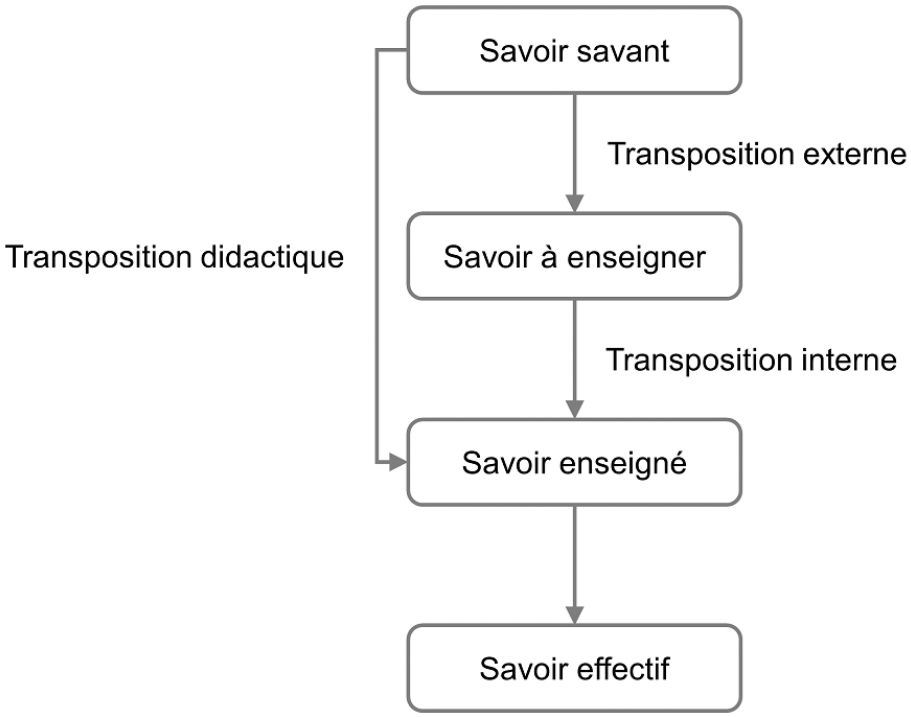


Figure 2 : Principe général de la transposition didactique

En plus des processus de transposition didactique externe et interne, le savoir subit encore une dernière transformation pour passer du « savoir enseigné » au « savoir effectif ». Elle est due à l'apprenant lui-même, à la façon dont il va percevoir le savoir sur base des interactions qu'il a avec l'enseignant, de ses acquis antérieurs, de ses préoccupations, de ses centres d'intérêt, …

Ce cadre théorique va permettre d'analyser les transformations qu'a subie la méthode permettant d'écrire un résultat avec une précision adéquate (savoir savant) pour en arriver au procédé impliquant l'utilisation de règles tel qu'enseigné à l'Université de Namur (savoir enseigné). Il est alors possible de comprendre l'impact de ces transpositions didactiques sur la manière dont les étudiants retranscrivent leurs résultats expérimentaux (savoir effectif).

1.2. La théorie anthropologique du didactique (TAD)

Le savoir subit donc toute une série de transformations qui sont différentes d'une personne ou d'un groupe à l'autre et donc également d'une institution à une autre. Cette dépendance à l'institution a été mise en lumière par Yves Chevallard dans les années 80. Il part du postulat que les savoirs et savoir-faire sont tous des constructions humaines. A ce titre, ils doivent être diffusés via l'enseignement ou les différents types de médias tels que les journaux, la télévision, les livres, les sites internet, … Toutes ces connaissances ne sont pas transmises et pratiquées de la même manière d'une institution à l'autre. La théorie anthropologique du didactique ne permet pas d'étudier les transformations subies par le savoir pour être rendu enseignable mais rend compte des différences liées à la mise en place et à l'utilisation des savoirs d'une institution à l'autre. Elle a pour objet d'étude les pratiques de l'enseignant ou de l'apprenant au sein d'une institution.

Le terme anthropologique se rapporte à l'étude de l'être humain sous tous ses aspects, qu'ils soient physiques ou culturels. Dans le cadre de la théorie initiée par Chevallard (Bosch & Chevallard, 1999; Chevallard, 1992, 1998, 2003), cette dénomination est employée avec l'idée que les savoirs sont des constructions humaines. La manière dont ils vont être abordés et employés va dépendre des personnes et des institutions auxquelles elles sont assujetties. En d'autres termes, les pratiques mettant en œuvre les savoirs vont différer d'une institution à l'autre voire d'une personne à l'autre. Il en est de même pour les activités impliquant ces pratiques.

Bosch & Chevallard (1999) citent le terme d'activité quand ils la décrivent comme un agir d'une personne ou d'un groupe réalisant des actions à l'aide d'objets matériels. Ils poursuivent en stipulant que, lors de « *toute activité humaine, il y a co-activation d'objets ostensifs et d'objets non ostensifs*. ». Les objets ostensifs réfèrent aux objets perceptibles tels que du matériel, des sons, des gestes, etc. Par opposition, les objets non ostensifs se situent plutôt dans le monde de la pensée et des concepts. L'activité n'implique donc pas que des objets matériels. Elle n'est cependant perceptible qu'au travers de l'utilisation des objets ostensifs, qu'ils soient matériels ou non. Quant aux objets non ostensifs, ils ne peuvent qu'être évoqués en lien avec les objets ostensifs associés. Pour que ces objets existent, il faut qu'une personne ou une institution les connaissent et les utilisent c'est-à-dire, d'après Chevallard, qu'il doit exister un rapport entre la ou les personnes ou l'institution et l'objet dont il est question.

Le didactique intervient lorsque le rapport qu'une personne ou une institution entretient avec l'objet change. Dans le monde enseignant, ce changement se produit généralement

grâce à une autre personne, l'enseignant, ayant la volonté de faire connaître l'objet ou d'en modifier les caractéristiques déjà présentes.

L'objet à faire connaître n'est pas unique mais est constitué d'un ensemble de savoirs et de savoir-faire dont il faut rendre compte dans le cadre d'une analyse. Le concept de praxéologie est né de ce besoin d'une méthode d'analyse de ces ensembles de savoirs et de savoir-faire et, plus particulièrement, des pratiques des personnes ou des institutions. Une praxéologie subdivise l'activité en quatre éléments : la tâche, la technique, la technologie et la théorie (Bosch & Chevallard, 1999; Chevallard, 1992, 1994, 1998). Toutes les pratiques adoptées dans une institution sont composées d'un système de tâches ou de types de tâches. Une tâche est définie par un verbe d'action suivie d'un déterminatif permettant de la délimiter. Ce déterminatif est spécifié par un ensemble de variables dont les rôles principaux sont de générer des sous-types de tâches et de caractériser la portée des techniques (Bessot, 2015; Chaachoua, 2010). Par exemple, titrer une solution par une autre de telle concentration ou peser x grammes d'une substance donnée sont des tâches. Les variables de ces tâches sont la concentration des solutions, leur nature, le type de réaction qui va avoir lieu, … pour le premier exemple et la masse et la substance à peser, l'état de la matière dans lequel se présente cette substance, … pour le second. Ces éléments vont permettre d'avoir une série de sous-types de tâches mais aussi avoir un impact sur la portée de la technique. Il est clair que nous ne tenterons pas de titrer une solution dont la concentration est beaucoup trop faible ou au contraire beaucoup trop importante. D'autres techniques devront être utilisées dans ces deux derniers cas.

Toute tâche peut être réalisée à l'aide d'une technique qui se définit alors comme la manière de faire pour exécuter la tâche ou comme une liste de sous-types de tâches (Bessot, 2015; Chaachoua, 2010).Cette idée sous-tend en partie le modèle T4TEL développé par Chaachoua (Chaachoua, 2018b, 2018a). Ce dernier définit différents niveaux de types de tâches. Les techniques sont définies comme des types de tâches. Chaque type de tâche peut lui-même être décrit par une technique et être décomposé en d'autres types de tâches. Ce mouvement se poursuit jusqu'à obtenir des types de tâches élémentaires dont il n'est pas nécessaire d'expliciter la technique. La tâche et la technique forment le bloc pratico-technique ou *praxis*. Il s'agit des savoir-faire. La technique implique l'utilisation d'objets ostensifs en relation avec une série d'objets non ostensifs associés. Un même type de tâche peut être exécuté à l'aide de différentes techniques mais, de manière générale, dans une institution donnée, il n'existe qu'une seule technique ou un petit nombre de techniques reconnues. Les autres techniques permettant elles aussi de

réaliser la tâche sont alors ignorées voire rejetées par le sujet du fait de son assujettissement à l'institution.

L'utilisation de telle ou telle technique pour réaliser une tâche donnée est régulée par des conditions et contraintes propres à l'institution, ce qui est appelé « *écologie des tâches et des techniques* » (Bosch & Chevallard, 1999, p. 82). Une technique ne sera utilisée dans une institution donnée que si elle est compréhensible et justifiée. Cette justification de la technique (et de la tâche) est appelée la technologie. Tout comme la technique, la technologie peut être différente d'une institution à l'autre. En effet, différents types de justifications peuvent exister : démonstration, expérimentation, … La technologie contient elle-même des éléments qui peuvent être justifiés par la théorie. Ces deux derniers éléments que sont la technologie et la théorie composent le bloc technologico-théorique aussi nommé *logos*.

Il n'est possible de faire une analyse praxéologique que sur une tâche ou un type de tâche bien précis. Ce n'est que connaissant la tâche à effectuer que la technique correspondante peut être déterminée ainsi que les justifications technologiques et théoriques correspondantes. Par exemple, si la tâche à réaliser est une dilution, la technique est constituée de l'ensemble des gestes nécessaires pour l'effectuer, la technologie est l'ensemble des assertions justifiant ces gestes et la théorie, les principes sous-tendant cette technique de laboratoire. La tâche peut aussi être de justifier la raison d'être des différents gestes à effectuer pour faire une dilution. Dans ce cas, la technique est plus conceptuelle car elle consiste en une réflexion sur les buts de chacun de ces gestes. Ainsi, ce qui est une tâche à un moment donné peut être un élément de technique, de technologie ou de théorie à un autre moment, dans le cadre d'une autre tâche.

En plus de caractériser des sous-types de tâches et la portée des techniques employées, les variables permettent aussi de décrire des praxéologies personnelles. Cette notion de praxéologie personnelle a été mise au point par Croset et Chaachoua (2016) comme une extension de la TAD. Elle est incluse dans le modèle T4TEL. Ils sont partis du principe que la praxéologie institutionnelle ne correspond pas toujours à la pratique de l'élève. Cette notion permet d'expliquer les « erreurs » commises par les élèves comme des praxéologies personnelles distinctes des praxéologies institutionnelles. Ces praxéologies personnelles ont les mêmes composantes que les institutionnelles mais se définissent en mettant au centre non l'institution mais l'élève (Chaachoua, 2018a; Croset & Chaachoua, 2016).

Un type de tâche personnel est « *l'ensemble des tâches que le sujet perçoit comme similaires, provoquant chez lui l'application d'une technique* » (Croset & Chaachoua, 2016, p. 180). Par exemple, il arrive, lors de l'apprentissage de la technique de titrage

qu'un étudiant tente de remplir la burette à l'aide d'une pipette jaugée alors qu'il suffit de la remplir directement à l'aide de la bouteille. Il n'est pas nécessaire de prélever la solution pour la transvaser dans la burette. Il est possible qu'il reproduise en réalité un geste technique à réaliser lors d'une dilution. En effet, au cours de cette dernière, la solution à diluer est prélevée à la pipette et transvasée dans le ballon jaugé. L'étudiant utilise alors une technique de transvasement dans la burette similaire à celle utilisée pour transvaser un volume de solution dans un ballon jaugé. Une technique personnelle est utilisée par l'apprenant pour réaliser un type de tâche personnel. Il faut souligner que les types de tâches et techniques personnels ne sont pas pour autant erronés. Ils peuvent parfois correspondre aux attendus institutionnels auquel cas l'apprenant « réussit ».
Une technologie personnelle correspond à la façon dont l'apprenant justifie la technique utilisée. Une théorie personnelle est alors une justification de la technologie personnelle.

Ce cadre théorique est utilisé pour analyser les techniques de laboratoire telles que prescrites par l'institution et la façon dont les étudiants accomplissent les tâches mettant en œuvre ces dernières lors des activités expérimentales. Une comparaison peut alors être faite entre les prescrits et ce qui est effectivement réalisé par les étudiants.

Les deux cadres théoriques présentés précédemment permettent de faire des analyses centrées sur le savoir :

- les transformations qu'il subit ;
- la manière dont il est utilisé par un ou des acteurs du fait de leur(s) assujettissement(s) à une (ou des) institution(s).

Pourquoi ne pas changer d'optique pour s'intéresser aux acteurs eux-mêmes ? Puisque le savoir est transformé et employé différemment en fonction des institutions auxquelles les acteurs sont assujettis, une analyse centrée sur ces derniers pendant qu'ils emploient leurs connaissances permettrait d'obtenir des données sur la manière de penser le savoir, sur la manière dont il est perçu, utilisé et, éventuellement, transformé.
La théorie de l'activité s'intéresse aux individus ou groupes d'individus dans le but de comprendre les modes de fonctionnement ou de pensée lors d'activités professionnelles, d'enseignement, d'apprentissage, …

1.3. La théorie de l'activité

1.3.1. Origines et principes de la théorie

La théorie de l'activité trouve son origine dans les travaux de psychologie russe du début de XXe siècle. Le chercheur qui a posé les prémisses de cette théorie est Lev Vygotski (1896 – 1934) en étudiant le développement de l'enfant. Il travaille en parallèle de Jean Piaget (1896 – 1980) qui pensait que les apprentissages se faisaient par une série de déséquilibres et de rééquilibrations à des stades de développement particuliers. Il y a, pour lui, primauté du développement sur l'apprentissage. Il est nécessaire, selon lui, que l'enfant ait développé les structures cognitives nécessaires à l'apprentissage envisagé. Dans ce cadre, les outils culturels tels que le langage, les arts, l'histoire, … ainsi que toutes les formes et moyens de communication ne sont que des facteurs permettant d'accélérer ou de retarder les apprentissages. Vygotski, quant à lui, pensait que le développement était issu d'activités effectuées à l'aide d'outils dans un environnement social (Brossard, 2004). Les activités sont de deux types (Figure 3) :

- l'activité extérieure dans laquelle l'outil est utilisé pour transformer l'environnement, la nature, …
- l'activité intérieure, dont l'outil est le signe, a pour objectif de maîtriser les comportements des autres ou les siens propres.

Dans ce dernier type d'activité, le signe doit être compris comme signe linguistique, éléments culturels permettant de communiquer avec autrui ou soi-même.

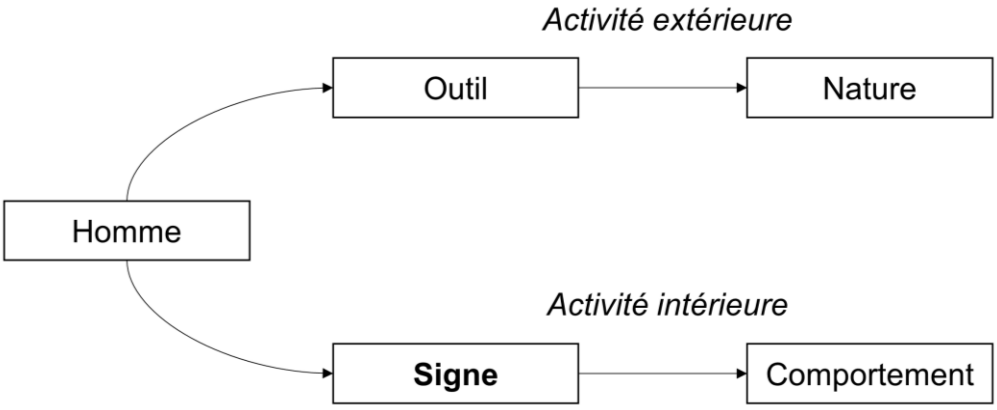


Figure 3 : Caractéristiques de l'activité extérieure et intérieure dans la théorie de Vygotski (d'après Nosulenko & Rabardel, 2007)

Vygotski, lors de ses recherches, s'est intéressé à l'activité intérieure. Pour lui, chaque individu naît avec un certain nombre de fonctions psychiques élémentaires qui vont être transformées au cours de la vie en fonctions psychiques supérieures par les acquis et apprentissages réalisés. Tout comme Piaget, il pense que les apprentissages doivent être

organisés en fonction du développement de l'individu. Il est donc nécessaire d'organiser les activités que l'individu ne sait pas encore faire en fonction de ce qu'il sait faire tout seul. La différence avec Piaget est que, pour Vygotski, l'apprentissage doit précéder le développement. Tout développement se fait grâce à des apprentissages. D'après les différents textes de Vygotski, il faut remplir trois conditions pour qu'il y ait réel apprentissage et donc développement.

Tout d'abord, aucun apprentissage ne se fait au travers d'actions élémentaires telles qu'écrire plusieurs fois la même lettre de l'alphabet ou additionner deux nombres mais lors « *activités culturelles complexes dotées de sens* » (cité par Brossard, 2004) comme apprendre à lire, à écrire, à résoudre des problèmes, … Les activités d'apprentissage doivent donc être complexes et avoir du sens. C'est la première des conditions pour qu'il y ait apprentissage. Les activités sont complexes si elles impliquent d'effectuer plusieurs actions. Ainsi, lors de l'apprentissage de l'écriture, il ne s'agit pas seulement de savoir retranscrire les lettres de l'alphabet mais aussi de les combiner pour écrire des mots et des phrases ayant une signification. Elles sont dotées de sens à partir du moment où elles peuvent servir plusieurs autres activités. Par exemple, savoir écrire permet de rédiger une lettre ou un petit mot autant qu'un article ou un livre.

La seconde condition concerne les outils employés. Au cours de l'Histoire, les individus ont développé des outils techniques (matériels) et psychologiques (symboles, signes linguistiques, …). Ces outils sont présents pour l'individu qui ne doit, dès lors, plus les créer mais se les approprier. L'appropriation de ces outils se fait au travers des activités susmentionnées et engendre une transformation au niveau psychique. Vygotski parle de médiatisation de l'activité par les outils. Etant donné qu'il s'est surtout intéressé à l'activité intérieure, les outils, dans ce cas-ci, sont les signes, les symboles, ... Ces outils impactent l'activité tant d'un point de vue technique que psychologique.

La caractéristique suivante concerne l'aspect social de l'apprentissage. Apprendre implique de résoudre des problèmes ou d'acquérir des concepts qui se situent au-delà de ce qui est déjà appris. Ces nouveaux savoirs ou ces nouvelles capacités s'acquièrent plus facilement avec la collaboration de quelqu'un possédant un niveau intellectuel supérieur. La différence entre ce que l'individu connaît et ce qu'il est capable d'apprendre en collaboration avec autrui est ce que Vygotski a appelé une zone de développement proximal ou zone de développement prochain (Figure 4, page ci-après).

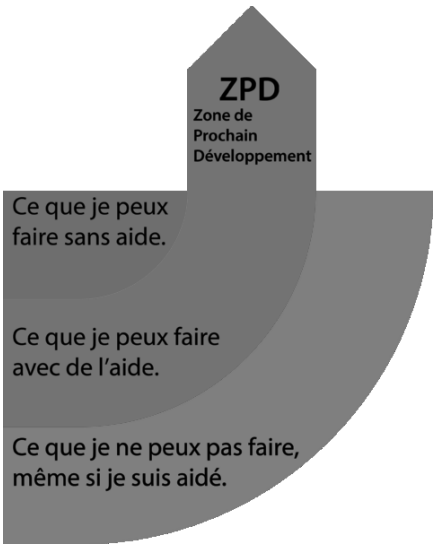


Figure 4 : Zone de développement proximal [8]

Par la suite, l'individu doit s'approprier ce nouveau savoir ou cette nouvelle capacité. Il le fait par intériorisation de l'activité. En s'intériorisant, elle se réorganise et engendre un apprentissage.

Ainsi, pour Vygotski, il y a apprentissage au cours d'activités complexes dotées de sens impliquant des outils les médiatisant et se déroulant dans un environnement social adéquat. Cette théorie du développement social de Vygotski pose les bases de la théorie de l'activité (Brossard, 2004; Nosulenko & Rabardel, 2007).

C'est à Alexis Léontiev (1903-1979) que l'on doit le cadre conceptuel de la théorie de l'activité. Etant disciple de Vygotski, il a connaissance de tous ses travaux relatifs au développement de l'enfant. Contrairement à Vygotski, Léontiev ne s'intéresse non pas à l'activité intérieure mais à l'extérieure. Pour lui, cette dernière a un impact sur le développement de l'activité mentale (Dafermos, 2015). Léontiev distingue deux significations au mot « activité » :

- les processus biologiques et physiologiques qui sont liés à la réaction des organismes à des stimulus (internes ou externes) ;
- les rapports que les individus ont avec l'environnement qui les entoure.

Au cours de ses recherches, il pose les principes de base de la théorie de l'activité dans le deuxième sens donné au terme (Dafermos, 2015; Engeström, 2001; Hasan & Kazlauskas, 2014; Hashim & Jones, 2007; Kaptelinin, 1996; Kaptelinin, Kuutti, & Bannon, 1995; Nosulenko & Rabardel, 2007; Venturini, 2012).

En plus de l'aspect collectif ou social de l'activité, cette dernière est aussi orientée vers un objet. L'objet, par ses propriétés physiques, chimiques, biologiques mais aussi sociales, psychologiques, culturelles, … conditionne l'activité. Ainsi, il ne considère pas

que les signes comme Vygotski mais l'ensemble des objets qu'ils soient matériels ou culturels. Pour lui, l'individu interagit avec les objets présents dans son environnement au travers d'une activité sensitivo-pratique ou extérieure si l'objet est matériel, et au travers d'une activité intérieure si l'objet est un élément de la conscience tel que des images mentales, des pensées, des réflexions, … Tous ces objets sont appelés des artéfacts et médient ou médiatisent l'activité du sujet, ce dernier pouvant être un individu ou une communauté de personnes. Cette idée est communément modélisée par le triangle présenté à la figure 5.

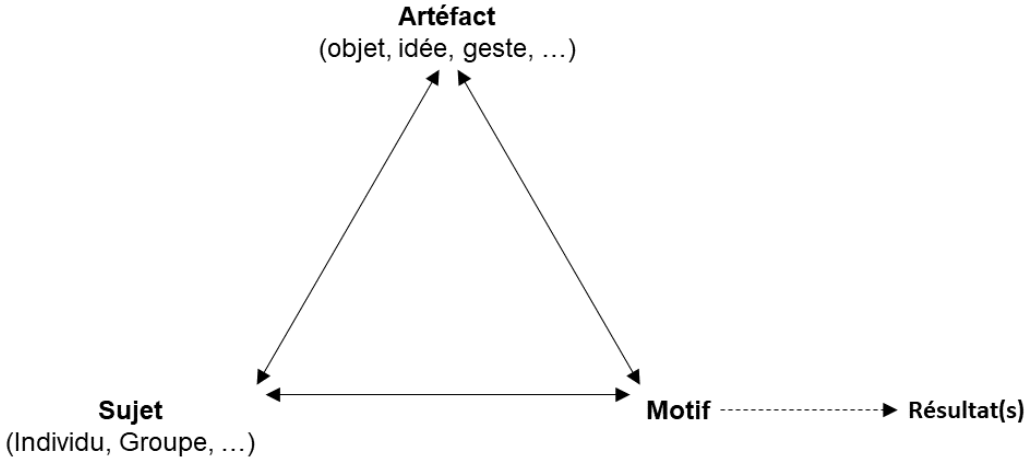


Figure 5 : Modèle de médiation par les artéfacts (d'après Hashim & Jones, 2007)

Le sujet, dans le cadre d'une activité ayant un motif, mobilise différents artéfacts, différents moyens pour obtenir les résultats escomptés.

Les deux types d'activité, intérieure et extérieure, sont liées entre elles par les processus d'intériorisation et d'extériorisation (Figure 6, page ci-après). Durant l'enfance, le processus le plus courant est celui d'intériorisation. En effet, l'enfant commence par percevoir les objets autour de lui, leurs différentes propriétés (couleur, forme, utilité, …). Il exécute une activité extérieure qu'il va intérioriser dans le cadre d'un apprentissage. Par la suite, les apprentissages effectués peuvent être remobilisés dans le cadre d'une autre activité. C'est alors le processus inverse qui se déroule, celui d'extériorisation. L'activité est d'abord pensée, elle est intérieure, avant d'être exécutée.

Lors d'une activité, il y a constamment passage de l'activité intérieure à l'activité extérieure et vice-versa.

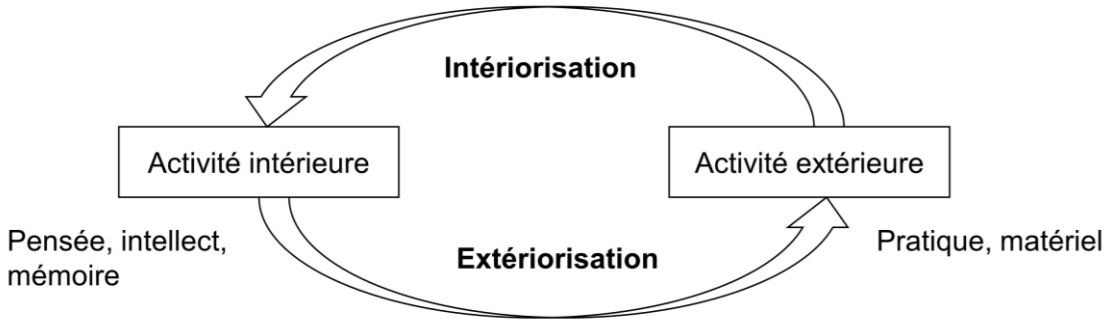


Figure 6 : Relation entre activité intérieure et extérieure selon Léontiev (d'après Nosulenko & Rabardel, 2007)

L'activité, considérée comme un tout, possède une structure à trois niveaux tel que montré à la figure 7. Le premier niveau est l'activité elle-même. Elle n'est exécutée que s'il y a une raison, un motif à son exécution. Pour la réaliser, le sujet doit effectuer des actions. Chacune de ces dernières poursuit un but conscient mais la raison pour laquelle elles sont effectuées revient toujours au motif de l'activité. Les actions sont accomplies au moyen d'opérations qui ne sont autres que les conditions de réalisation des actions. Ces opérations permettent d'ajuster les actions à la situation mais n'ont pas de but en tant que tel. Ce sont des pratiques habituelles, faites inconsciemment (Hasan & Kazlauskas, 2014; Hashim & Jones, 2007; Venturini, 2012).

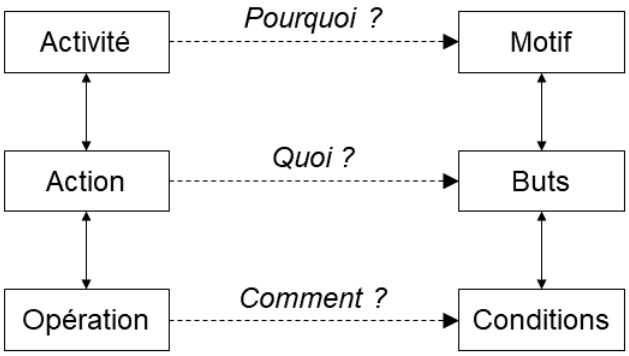


Figure 7 : Hiérarchie de l'activité de Léontiev (1981)

L'activité ne perd pas sa structure mais peut se transformer en action lorsqu'elle perd son motif. De même, l'action peut devenir une opération lorsqu'elle est automatisée. Ce mouvement peut aussi aller dans l'autre sens. Une opération peut acquérir un but et devenir une action et une action peut avoir un motif et devenir une activité.

En parallèle de Léontiev, Sergueï Leonidovitch Rubinstein (1889–1960) étudie lui aussi l'activité mais en analysant les œuvres de Karl Marx (1818-1883) (Dafermos, 2015; Nosulenko & Rabardel, 2007). Il découvre que le psychisme, qu'il appelle aussi la conscience, est lié aux objets employés lors des différentes activités : « *La conscience (le*

psychisme) apparaît, se forme, se développe, s'accomplit et se manifeste dans l'activité » (cité par Nosulenko & Rabardel, 2007). Le mot « conscience » est à comprendre comme étant l'esprit humain pris comme un tout. Pour Rubinstein, la conscience ne fait donc pas que se développer au cours de l'activité. Elle a un impact sur l'activité elle-même. La conscience se forme au cours de l'activité et la transforme. Ce faisant, la conscience est aussi transformée. La conscience et l'activité forment un tout, tous deux impliqués dans l'interaction entre le sujet et l'objet ou l'artéfact. Cette idée est l'une des plus connue de Rubinstein, l'unité de la conscience et de l'activité (Figure 8).

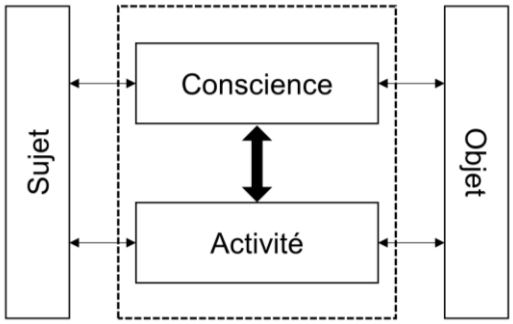


Figure 8 : Conscience et activité dans la structure des relations sujet-objet selon Rubinstein (d'après Nosulenko & Rabardel, 2007)

La théorie de l'activité implique donc :

- une orientation à l'objet, à l'artéfact ;
- une nature sociale ;
- des processus d'internalisation et d'externalisation ;
- une unité avec la conscience dans la relation entre le sujet et l'objet ;
- une structure hiérarchique à trois niveaux.

En plus de cela, Léontiev pose qu'il faut considérer l'activité dans sa nature collective. Une activité peut être effectuée par plusieurs personnes qui ont, chacune, la responsabilité d'une partie de l'activité. Cette dernière ne peut alors être comprise qu'en la considérant dans son ensemble. Le modèle de l'activité représenté à la figure 9 (page ci-après) n'a pas été établi par Léontiev mais en reprend l'idée de communauté, défini comme l'ensemble des sujets ayant le même motif d'effectuer l'activité. Pour envisager l'activité comme communautaire, deux items ont été rajoutés : les règles, qui regroupent les normes, conventions et habitudes gouvernant la communauté, et la répartition du travail, qui implique le partage des actions entre les différents membres du groupe. Ce nouveau modèle, établi par Engeström, représente un système d'activité (Engeström, 2001; Hashim & Jones, 2007; Venturini, 2012).

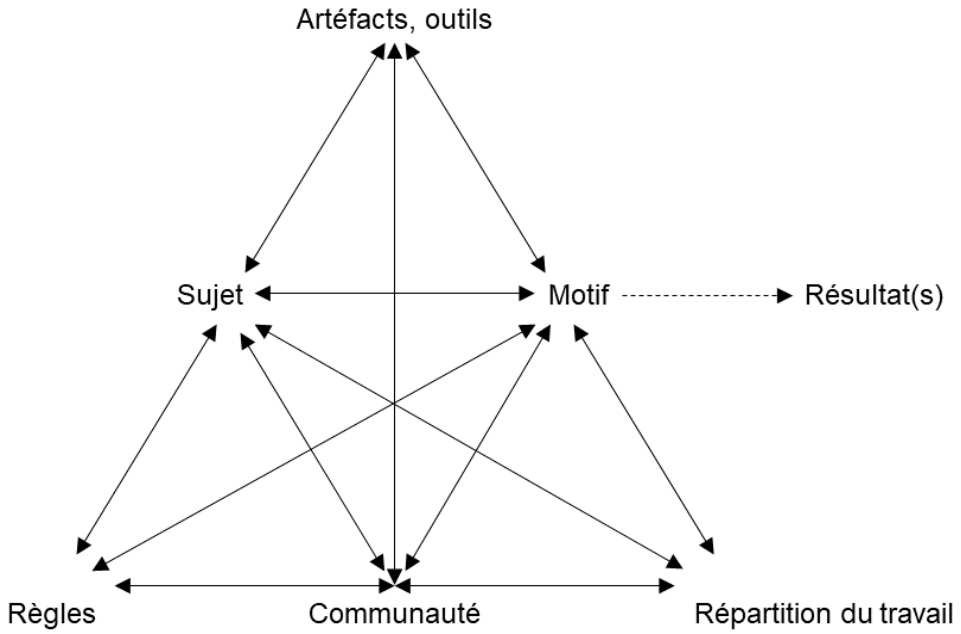


Figure 9 : Structure d'un système d'activité, d'après Engeström (1987, p.78 ; 2001, p.135)

Une autre évolution de la théorie de l'activité part du principe que chaque système d'activité est en relation avec d'autres. Il est parfois difficile de les articuler car ils sont tous en constante évolution. L'analyse de ces systèmes permet de mettre au jour les éventuelles modifications nécessaires en vue de l'amélioration du dispositif (Engeström, 2000, 2001; Venturini, 2012).

1.3.2. Utilisation de la théorie de l'activité

La théorie de l'activité est utilisée dans différents courants de recherche comme la didactique professionnelle, la psycho phénoménologie ou encore le cours d'action et l'anthropologie située.

1.3.2.1. *La didactique professionnelle*

La didactique professionnelle a pour but d'analyser le travail pour construire des situations de formation. Ces dernières simulent des situations de travail dans la visée de former des personnes ayant les compétences requises (Champy-Remoussenard, 2005; Pastré, 2002, 2011a).

Pour cela, ce courant associe trois cadres théoriques que sont la conceptualisation dans l'action de Piaget et Vergnaud, l'analyse de l'activité en situation de travail développée essentiellement par Faverge et Leplat et la théorie des situations didactiques de Brousseau (Pastré, 2011a).

L'analyse du travail passe par l'analyse de situations de travail, le terme « situation » étant à comprendre comme « *l'ensemble des circonstances dans lesquelles une personne se trouve, et des relations qui l'unissent à son milieu* » (Brousseau, 1997). La didactique professionnelle fait donc appel à la théorie des situations didactiques de Brousseau dont l'idée principale est que les apprentissages, l'acquisition de connaissances se font au travers de situations particulières pouvant en être la source. Pratiquement, un professionnel d'un domaine donné impliqué dans une situation posant problème va chercher à résoudre la difficulté et, ce faisant, apprendre à maîtriser la situation (Pastré, 2011a).

Pour réaliser des situations de formation simulant ces situations de travail, il est nécessaire d'analyser ces situations de travail ainsi que les compétences requises. Pour analyser ces dernières, il faut analyser l'action permettant d'obtenir le résultat escompté, c'est-à-dire l'action efficace. C'est l'organisation de cette dernière qui constitue ce qui est sous-entendu dans le terme « compétence » (Pastré, 2002). C'est là qu'interviennent la conceptualisation dans l'action et l'analyse de l'activité en situation de travail.

L'analyse de l'activité en situation de travail implique tout d'abord d'analyser la tâche prescrite. Il s'agit de déterminer les actions à poser, les règles de travail en vigueur et les paramètres des actions à effectuer en fonction des résultats à obtenir. Ce n'est qu'après que l'activité elle-même peut être analysée. Le postulat de ce type d'analyse est qu'il y a toujours un écart entre la tâche prescrite et l'activité réelle du sujet (Leplat & Hoc, 1983). Lors d'une situation de travail particulière, un professionnel n'exécute pas à la lettre la tâche prescrite. Il va en effet adapter ses actions aux situations auxquelles il est confronté. L'analyse consiste alors à déterminer les concepts pragmatiques c'est-à-dire les concepts servant à identifier, dans des situations spécifiques, des éléments appelés indicateurs et les actions menées en fonction des informations données par ces indicateurs. Ce sont des concepts qui permettent d'orienter l'action et donc de l'organiser. Ce sont donc des concepts organisateurs de l'activité (Champy-Remoussenard, 2005; Pastré, 2002, 2011b, 2011a).

Dans la théorie de la conceptualisation dans l'action, Vergnaud appelle ces concepts organisateurs des invariants opératoires. Il les définit comme des éléments conceptuels présents dans ce qu'il appelle des schèmes et qui représentent l'ensemble des actions exécutées dans des situations particulières. Plus particulièrement, un schème est défini comme « *une organisation invariante de l'activité pour une classe de situation donnée* » (Vergnaud (1990) cité par Pastré, 2011a). La conceptualisation ne survient que lors de la mise en mots, du récit de ce qui a été vécu dans la situation donnée. C'est à ce moment-là que le sujet se rend compte, prend conscience du sens des actions réalisées et des

éventuelles erreurs commises. C'est le moment de l'apprentissage (Champy-Remoussenard, 2005; Pastré, 2002).
La didactique professionnelle utilise la méthodologie employée lors de l'analyse de l'activité en situation de travail pour déterminer les invariants opératoires dans des activités professionnelles en vue de créer des formations adéquates.

1.3.2.2. *La psycho phénoménologie*

La psycho phénoménologie est un courant initié par Pierre Vermersch et cherchant à étudier le vécu d'un sujet lors d'une activité particulière. Sa théorie est basée essentiellement sur les travaux de psychologue Jean Piaget (1896 – 1980) et du philosophe Edmund Husserl (1859 – 1938) (Champy-Remoussenard, 2005; Mouchet, 2016; Vermersch, 1997, 2004).
Pour Vermersch, il y a, dans l'action effective, les actions matérielles, les actions matérialisées et les actions mentales. Les actions matérielles et matérialisées sont observables car elles impliquent du mouvement pour les unes et la production d'objets pour les autres. Les actions mentales, quant à elles, sont entièrement intériorisées. Il s'agit d'actes de pensée, de prise de décision, … (Mouchet, 2016). En s'intéressant au vécu du sujet réalisant l'action, Vermersch ne vise pas que ce qui est observable mais aussi ce qui ne l'est pas c'est-à-dire les actions mentales. Tout acte n'est que partiellement conscientisé. Par exemple, pendant que j'écris ces lignes, je suis consciente d'écrire et connais le texte à écrire mais ne fais pas attention à la manière de former les lettres ou de déplacer ma main, de bouger mes doigts. C'est la différence entre la conscience réfléchie et la conscience pré-réfléchie selon Husserl aussi appelée conscience en acte par Piaget. Pour connaître le vécu, il faut qu'il y ait une prise de conscience de cette partie « pré-réfléchie ». Pour Piaget, le sujet possède les connaissances liées à l'acte posé mais elles ne sont pas toutes conscientisées. Il faut amener le sujet à prendre conscience des connaissances pré-réfléchies. Ce passage de la conscience en acte ou pré-réfléchie à la conscience réfléchie est appelée « réfléchissement ». Il ne se fait généralement pas tout seul mais nécessite un élément du rappel ou une personne qui permette au sujet de revenir sur son vécu. Dans le cadre d'une recherche, il s'agit d'une personne. Elle doit poser une question appelée une « intention éveillante » pour faire revenir le sujet au moment précis de l'acte réalisé, pour qu'il y ait « ressouvenir ». Au départ, le sujet ne se souvient généralement que de l'acte lui-même mais pas du pré-réfléchi. Il a alors l'impression de ne plus se souvenir, de ne plus savoir. Avec l'aide du chercheur, il est possible qu'il se rappelle par la suite certaines informations d'ordre sensorielles ou cognitives. Il y a alors « remplissement intuitif » du

ressouvenir par un processus d'« évocation ». L'évocation consiste à rendre à nouveau présent le vécu. Les informations revécues ne sont pas encore mises en mots. Le sujet est alors amené à verbaliser ce vécu (Maurel, 2013; Mouchet, 2016; Vermersch, 1996, 1997, 2004).

La méthode d'entretien proposée par Vermersch pour atteindre ce résultat est l'entretien d'explicitation (Maurel, 2013; Vermersch, 2004). Ce type d'entretien implique de :

- déterminer un moment particulier de l'activité pour éviter que le sujet ne fasse de généralisation sur son activité ;
- questionner sans induire de réponse c'est-à-dire poser des questions ouvertes en évitant d'utiliser un vocable que le sujet n'a pas employé ou de nommer directement le contenu de la question (ex. : parler de « ce que vous pensez à ce moment » ou de « ce à quoi vous êtes attentif ») ;
- tenter d'avoir accès à des éléments supplémentaires dont la personne qui mène l'entretien n'a pas connaissance et que le sujet n'a pas évoquée en posant une question comme « Y a-t-il autre chose que vous souhaitez ajouter ? » ;
- avoir d'autres traces de l'activité.

1.3.2.3. *Le cours d'action*

Le cours d'action est défini par Theureau comme « *l'activité d'un (ou plusieurs) acteur(s) engagé(s) dans une situation qui est significative pour ce (ou ces) dernier(s) c'est-à-dire montrable, racontable et commentable pour lui (ou pour eux) à tout instant, moyennant des conditions favorables* » (cité par Champy-Remoussenard, 2005, p.29).

La théorie sous-tendante peut être synthétisée à partir de cinq présupposés (Durand, 2007). Le premier est l'autonomie du sujet ou autopoïèse. Le sujet en activité interagit avec son environnement. Il va s'adapter à cet environnement en fonction de certaines caractéristiques particulières de ce dernier, celles qui sont significatives pour lui. Ce faisant, l'environnement est transformé par le sujet qui doit alors « *compenser les perturbations provoquées par ses interactions avec l'environnement* » (Astier et al., 2003, p. 120). Ainsi, le sujet, par son activité, transforme l'environnement et l'environnement le transforme à son tour. Ce processus d'interactions entre un sujet et son environnement est appelé « couplage structurel ».

Le deuxième présupposé est celui de la conscience pré-réflexive. Dans sa théorie, Theureau distingue trois types de conscience (Mouchet, 2016) :

- la conscience pré-réflexive consiste en tout ce que le sujet peut appréhender durant l'activité, ce qu'il peut montrer, raconter, commenter de son activité, ce que Theureau appelle l'expérience du sujet ;

- la conscience réflexive est ce que le sujet peut dire, commenter de son activité par la suite, à un moment postérieur ;
- la conscience historique est le vécu du sujet au niveau collectif.

Nous pouvons avoir accès à des éléments de n'importe quel type de conscience au travers des différentes méthodes qui sont présentées plus loin.

Le troisième présupposé est celui de la médiation sémiotique. Pour Theureau, l'activité est déterminée par des signes. Elle est définie comme un cours d'action, ce qui veut dire qu'elle est constituée d'un enchaînement d'unités significatives, de gestes ou de comportements qui un sens pour le sujet. Ces unités significatives sont ce que Theureau considère être des signes. Ces signes sont dits « triadiques » car composés d'un « objet » en relation avec un « représentamen » par la médiation d'un « interprétant ». L'objet est « *l'engagement de l'acteur dans une totalité de possibles* » (Theureau, 1996, p.49) c'est-à-dire peu ou prou l'activité du sujet. Il s'agit de ce qui est représenté par le représentamen. Ce dernier correspond au signifiant dans la relation signifiant/signifié. En d'autres termes, le représentamen est le signe que le sujet perçoit et qui peut être de nature symbolique, iconique, … L'interprétant est la règle suivie par le sujet et qui fait le lien entre l'objet et le représentamen.

Le quatrième présupposé est celui d'auto-détermination. Theureau part du principe que l'activité comporte plus que ce qui est prescrit. A chaque instant, il y a une série de possibles que le sujet va faire ou non en fonction de la situation. L'action peut éventuellement être généralisée par un processus de typicalisation ou de typification. Ce processus est défini comme « *un processus par lequel un individu reconnaît certaines expériences (événements ou situations) singulières en tant que phénomènes (significations données instantanément à la perception du monde) typiques c'est-à-dire récurrents dans des contextes perçus comme similaires* » (Astier et al., 2003, p.124)

Le cinquième et dernier présupposé est l'auto-construction. Il suppose que l'activité est continuellement transformée et qu'il n'y a apprentissage qu'au travers de l'action.

Cette théorie du cours d'action a pour objectif d'être un outil d'analyse de l'activité en vue de la conception de nouvelles situations de travail, de la formations, … (Champy-Remoussenard, 2005) Pour cela, elle utilise différentes méthodes lui permettant d'avoir accès à différents éléments de l'activité (Champy-Remoussenard, 2005). Il est d'abord nécessaire d'observer l'activité en tant que telle pour identifier certains comportements du ou des sujets. Par la suite, il faut recueillir les verbalisations du ou des sujets de l'activité au travers de diverses méthodes composant l'observatoire du cours d'action (Champy-Remoussenard, 2005; Theureau, 1996). Parmi ces méthodes se trouve l'entretien d'autoconfrontation durant lequel le sujet est confronté à son activité au travers

d'une vidéo de celle-ci. Il lui est demandé de resituer l'action et de la commenter. La « verbalisation simultanée » est aussi une méthode permettant d'avoir des données sur l'activité. Le sujet explique ce qu'il fait, sa pensée, … pendant l'action. Dans le même ordre d'idée, la « verbalisation interruptive » consiste à interrompre l'activité du sujet pour lui demander de verbaliser l'action interrompue. En plus de ces trois méthodes, il arrive aux chercheurs de ce courant d'employer l'entretien d'explicitation de Vermersch. Toutes ces méthodes permettent d'avoir accès à différents éléments de la conscience.

La théorie de l'activité est utilisée à différents niveaux lors de la prise de données et les analyses. En effet, nous tentons d'avoir accès à certains éléments de l'activité de pensée des étudiants lors de l'étude de la manière dont ils reportent des résultats expérimentaux ainsi que lors de l'analyse de la compréhension qu'ils ont des techniques de laboratoire standards. Ces deux tâches, que sont le report de résultats expérimentaux avec la précision adéquate et l'application de techniques standards, sont inclues dans des activités plus complexes, la rédaction d'un rapport de laboratoire et l'expérience à réaliser, la manipulation en laboratoire, respectivement. Toutes les deux se déroulent dans un environnement particulier puisque les étudiants sont en interaction, accompagné d'un encadrant dans un laboratoire de chimie.

Plus particulièrement, la psycho phénoménologie est un cadre théorique intéressant lorsqu'il s'agit d'obtenir des informations sur des traces écrites d'une activité ou sur certains moments particuliers. Dans cette recherche, ce cadre est employé pour déterminer la manière dont les étudiants appliquent les règles permettant de transcrire des résultats expérimentaux avec une précision adéquate.

La didactique professionnelle et le cours d'action, quant à eux, sont mis en œuvre lors des différentes parties de la recherche liées à l'acquisition des techniques de laboratoire. En effet, dans ce cas, l'étude porte essentiellement sur une activité plus longue. Comme mentionné précédemment, les étudiants y travaillent l'un à côté de l'autre, avec du matériel particulier à la pratique de la chimie, … Cet environnement ne peut qu'avoir un impact non négligeable sur l'activité des étudiants.

Deux cadres théoriques sont donc employés de manière concomitante lors des prises de données concernant la technicité en laboratoire : la théorie anthropologique du didactique et la théorie de l'activité. Il faut dès lors qu'il y ait possibilité de les articuler ensemble.

1.4. Articulation entre la théorie anthropologique du didactique et la théorie de l'activité

Différentes assertions présentes dans des articles traitant de la théorie anthropologique du didactique laissent penser à une possible articulation avec la théorie de l'activité. En effet, Chevallard traite énormément d' « *activité mathématique* » (Bosch & Chevallard, 1999; Chevallard, 1994, 1998). Il va même plus loin dans ces écrits :
« *On présente dans ce qui suit un certain nombre de postulats d'un modèle de l'activité humaine. a) Toute activité humaine se laisse décomposer en un certain nombre de tâches*. » (Chevallard, 1994, p.190) ou « *la TAD situe l'activité mathématique, et donc l'activité d'étude en mathématiques, dans l'ensemble des activités humaines et des institutions sociales […] Le postulat de base de la TAD fait violence à cette vision particulariste du monde social : on y admet en effet que toute activité humaine régulièrement accomplie peut être subsumée sous un modèle unique, que résume ici le mot de praxéologie* » (Chevallard, 1998, p.9)
Faut-il comprendre que toute activité, quelle qu'elle soit, peut être analysée à l'aide du modèle praxéologique ? Il faudrait, pour cela, que les définitions du terme « activité » soient si pas équivalentes, du moins similaires pour tout le monde, que l'on soit tenant de la théorie anthropologique du didactique ou de la théorie de l'activité. Au niveau de la TAD, le terme d'activité est employé quand Bosch et Chevallard en viennent à devoir expliciter ce qu'est l'activité mathématique : « *un agir où interviennent des acteurs et des objets matériels –instruments qui prolongent le corps pour en augmenter la capacité (en force, en précision, etc.), ou éléments externes contre lesquels l'action se réalise* » (Bosch & Chevallard, 1999, p.85)
Dans le cadre de la théorie de l'activité, l'activité est plutôt définie comme « *l'ensemble des processus dans lesquels et par lesquels est impliqué un être vivant, notamment un sujet humain, individuel ou collectif, dans ses rapports avec son (ses) environnement(s) physique(s), social(-aux) et/ou mental(-aux), et transformations de lui-même s'opérant à cette occasion* » (Barbier et Thievenaz, cité par Mouchet, 2016, p.14)
Il existe des différences essentielles entre les deux descriptions :

- l'activité est décrite comme un « agir » au sens de l'exécution d'un mouvement perceptible dans la TAD alors qu'il s'agit plutôt d'un « ensemble de processus » impliquant un ou des sujets et de leur « transformation » dans la théorie de l'activité ;

- les objets impliqués dans l'activité semblent être, au premier abord, purement matériels dans la TAD tandis que la théorie de l'activité tient compte d'un « *environnement physique, social et/ou mental* »

En d'autres termes, dans la TAD, n'est considérée comme activité que ce qui est perceptible, ce qui correspond à l'activité dite externe chez Vygotski. Cependant, il faut souligner que Bosch et Chevallard ne cherchaient pas à donner de définition complète et circonstanciée du concept d'activité. Limiter l'activité à ce qui est accessible aux sens empêcherait toute analyse praxéologique, chaque élément de cette dernière faisant potentiellement intervenir des objets qui ne sont pas physiquement perceptibles. Les auteurs utilisent le terme « activité » pour en venir à présenter l'activité mathématique comme « *conditionnée par les instruments matériels, visuels, sonores et tactiles qu'elle met en jeu* » (Bosch & Chevallard, 1999, p.85). Dans la suite de l'article, ils traitent de concept, de « pensée » mathématique : « *On sait que l'absence d'un concept peut bloquer l'évolution de la « pensée » mathématique, aussi bien au niveau historique d'une communauté qu'au niveau individuel du chercheur ou de l'élève. Or on peut se demander jusqu'à quel point cette absence serait seulement l'absence d'une idéalité, d'une façon de « penser » ou de « concevoir » le monde, et non celle d'un complexe d'outils de travail, la plupart de nature matérielle, dont la disponibilité – ou, au contraire, l'absence – pourrait modifier de façon « catastrophique » le déroulement de l'activité. Nous croyons en effet que l'analyse didactique du développement du savoir mathématique – saisi dans la durée historique, dans l'histoire de vie d'une personne, ou dans la vie d'une classe – ne peut considérer comme secondaire cette dimension de l'activité, en lui assignant une pure fonction instrumentale dans la construction des concepts* » (Bosch & Chevallard, 1999, p.85-86). L'idée qu'il existe aussi des objets immatériels dont il faut nécessairement tenir compte lors de l'analyse de l'activité mathématique[1] apparaît. Les auteurs en viennent à distinguer deux types d'objets : les ostensifs et les non ostensifs qui se réfèrent respectivement aux objets perceptibles et aux éléments ne pouvant qu'être évoqués[2] ou invoqués. Le concept d'artéfact de la théorie de l'activité se retrouve peu ou prou dans ces descriptions des deux types d'objets : ce qui est nommé ostensif et non ostensif dans la TAD est objet matériel et signe dans la théorie de l'activité. Une différence persiste cependant : les ostensifs et non ostensifs ont un caractère institutionnel. Ils ne dépendent généralement

[1] Il est possible de généraliser à tout type d'activités. Cette façon de penser est effectivement valable pour d'autres activités comme des sciences, des langues, de la cuisine, de la lecture, …

[2] Le verbe évoquer pourrait faire penser au processus d'évocation lors des études psycho phénoménologiques alors que, dans ce dernier type d'étude, il s'agit de faire revivre des éléments de l'ordre de la conscience pré-réfléchie. Ce n'est clairement pas le cas dans la TAD.

pas de l'activité d'une seule personne mais d'un collectif au sein d'une institution dont chaque individu a une position particulière et donc une fonction. Ce collectif peut-il être rapporté à la notion de communauté régie par des règles et dont les individus ont, chacun, en charge une partie de l'activité ? Le modèle de l'activité proposé par Engeström pourrait alors ressembler à la figure 10.

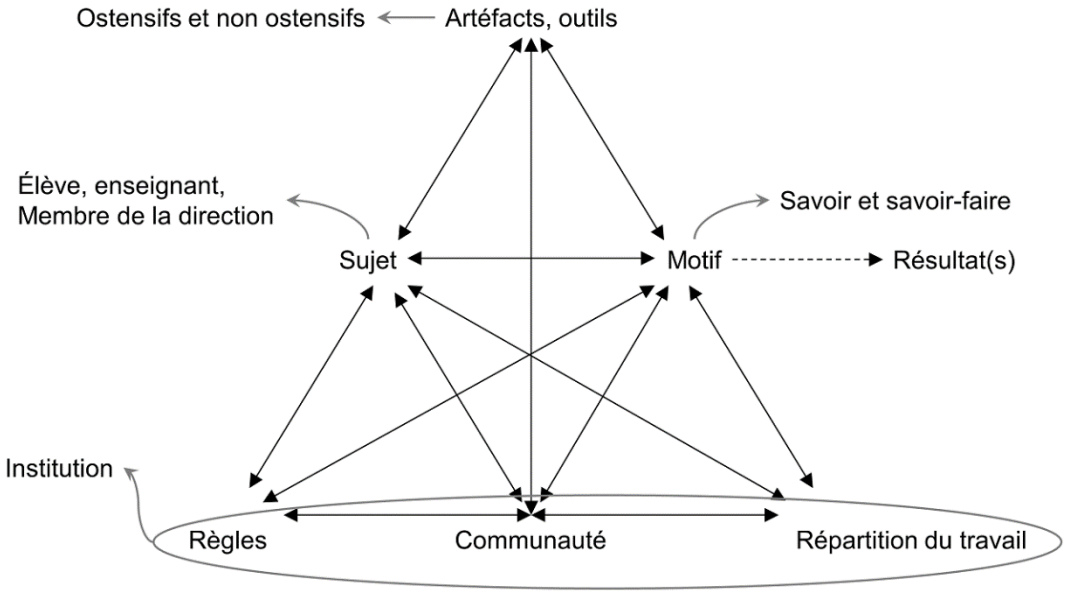


Figure 10 : Modèle de l'activité d'Engeström transformé pour tenir compte de la TAD

Au sein d'une institution, il y a effectivement des normes, des règles à respecter puisqu'il y a des techniques considérées comme conformes pour exécuter une tâche particulière. Une technique n'est conforme du point de vue de l'institution que si elle respecte certains prescrits avec un résultat visible. De plus, toutes les personnes faisant partie de l'institution ont un travail à réaliser. Cependant, toutes n'ont pas une tâche liée à un savoir, à l'activité objet d'étude de la TAD mais elles peuvent avoir un impact sur l'activité en question. Par exemple, un directeur d'école n'a pas d'impact direct sur un cours. Pourtant, comme sa charge implique d'engager l'enseignant, de mettre des outils à disposition, …, il a un impact non négligeable sur les pratiques d'enseignement.

Toujours en lien avec la conformité de la technique, Bosch et Chevallard exposent que, si la technique adoptée est conforme à celle attendue, on ne peut que le supposer pour les concepts et notions employées pour la mener à bien car elles ne sont pas observables : « *la mise en œuvre d'une technique se traduit par une manipulation d'ostensifs réglée par des non-ostensifs. Les ostensifs constituent la partie perceptible de l'activité, c'est-à-dire ce qui, dans la réalisation de la tâche, se donne à voir, aussi bien à l'observateur qu'aux acteurs eux-mêmes. Dans l'analyse du travail mathématique, les éléments ostensifs font partie du réel empirique, accessible aux sens. Par contraste, la*

présence de tel ou tel non-ostensif dans une pratique déterminée ne peut être qu'induite ou supposée à partir des manipulations d'ostensifs institutionnellement associés » (Bosch & Chevallard, 1999, p.87)

Ces concepts et notions ne font d'ailleurs pas toujours partie de la technique mais peuvent aussi se retrouver dans la partie technologico-théorique. Tout dépend de la tâche à mener à bien : « *la co-activation d'ostensifs et de non-ostensifs est toujours présente et apparaît à tous les niveaux d'activité, aussi bien au plan de la technique que de son environnement technologico-théorique* » (Bosch & Chevallard, 1999, p.88)

Dans cet extrait, les auteurs sous-entendent qu'il y a plusieurs niveaux d'activité qu'il faut comprendre comme étant la tâche, la technique, la technologie et la théorie.

Dans la théorie de l'activité, l'activité est aussi structurée en différents items : elle est constituée d'actions qui elles-mêmes sont composées d'opérations. Il est possible d'associer les actions et opérations à la praxis de la praxéologie tandis que le motif de l'activité et les buts poursuivis par les actions peuvent s'apparenter au logos comme illustré à la figure 11.

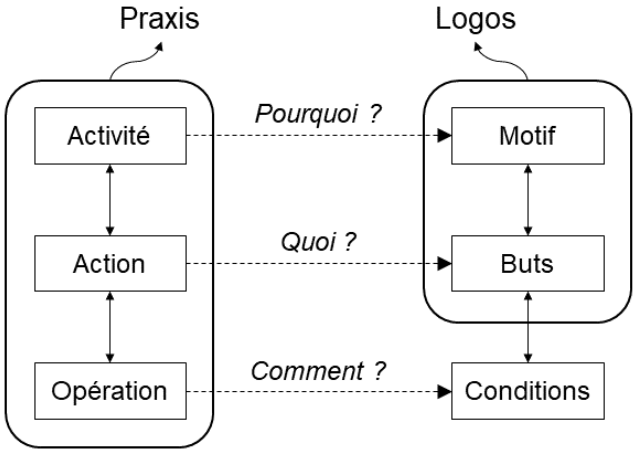


Figure 11 : Articulation des hiérarchisations de l'activité dans la TAD et la théorie de l'activité

Dans ce cas, à quoi correspondent les conditions liées aux opérations dans la TAD ? Les conditions sont les éléments de l'environnement qui vont impacter les gestes à réaliser. Il n'y a pas de notion d'environnement dans la TAD, juste celles d'objet et d'institution. Il n'y a donc pas de correspondant aux opérations. Pourtant, les opérations sont reprises dans la partie pratico-technique ou praxis et plus particulièrement dans la technique. Or, la technique peut être décrite comme un ensemble de types de tâches (Chaachoua, 2018b). Il est alors possible de décomposer chaque type de tâche en d'autres types de tâches justifiables par des éléments technologico-théoriques qui peuvent eux-mêmes être décomposés en d'autres types de tâches, … Ce mouvement se poursuit jusqu'à obtenir des types de tâches élémentaires qu'il n'est pas nécessaire de justifier. Ces types de

tâches élémentaires peuvent correspondre aux opérations si ces dernières sont considérées comme descriptibles malgré leur caractère routinier. Les conditions sont alors liées aux contraintes institutionnelles qui, dans le cadre scolaire, peuvent être les acquis que les élèves ont ou sont censés avoir, le matériel mis à disposition, … Une grosse différence subsiste cependant entre les deux théories : l'activité des élèves ne correspond pas toujours aux attendus institutionnels. La théorie de l'activité visant plutôt l'analyse de l'activité du sujet telle que vécue par ce dernier, elle permet assez facilement de comparer l'activité réelle de l'apprenant à celle qui est prescrite par l'institution. Pour ce qui est de la TAD, il faut faire appel au modèle T4TEL et plus particulièrement au concept de praxéologie personnelle (Chaachoua, 2018a; Croset & Chaachoua, 2016) pour pouvoir faire cette comparaison. Toutefois, un problème méthodologique est révélé lorsque Chaachoua traite de la technologie personnelle : « *Il est important du point de vue de la recherche d'expliquer l'origine des technologies personnelles non seulement dans les conditions et contraintes institutionnelles mais aussi dans le processus d'étude vécu par les élèves* » (Chaachoua, 2018a, p.409). Comment avoir accès à ce processus d'étude vécu ? Peut-être en demandant aux élèves eux-mêmes au travers d'entretiens d'explicitation et/ou d'autoconfrontation ? La théorie de l'activité pourrait ainsi être utile pour compléter la TAD. Comme la TAD est centrée sur le savoir, elle semble plus adaptée à l'analyse d'activité via des traces écrites (productions d'élèves, programmes, cours papier, livres scolaires, …). La théorie de l'activité, quant à elle, est centrée sur l'individu, le sujet. En effet, elle a pour objet d'analyse le vécu. Pour cela, le chercheur doit avoir accès à des traces du vécu aussi diverses et variées que des écrits, des vidéos, des verbalisations, … La théorie de l'activité permet donc d'avoir une connaissance ne serait-ce que partielle de l'activité interne au sens de Vygotski.

En conclusion, la TAD et la théorie de l'activité sont deux cadres théoriques permettant d'analyser l'activité en se centrant respectivement sur le savoir et sur le sujet. Nonobstant leurs différences, elles peuvent être utilisées de manière complémentaire.

2. La transcription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate

2.1. La méthode experte

2.1.1. Incertitude

L'un des acquis poursuivis lors des activités expérimentales est de pouvoir communiquer des résultats avec la précision adéquate. Cette dernière est en lien avec l'incertitude des mesures. Comme mentionné lors de l'introduction générale, à l'Université de Namur, les étudiants sont amenés à employer des règles en fonction de l'opération mathématique :

- *Le résultat d'une addition et/ou d'une soustraction compte autant de décimales que le terme du calcul qui en comporte le moins.*
- *Le résultat d'une multiplication et/ou d'une division compte autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul qui en comporte le moins.*

Ces règles ne font à aucun moment référence aux incertitudes. On peut alors se demander comment en est-on arrivé à ces règles, quels raisonnements ont été mis en œuvre pour les mettre au point. En clair, par quelles transformations est passée la méthode d'application dans les laboratoires de recherche et d'analyse pour les obtenir ? Pour répondre à cette question, il nous paraît important de revenir sur quelques éléments de cette méthode. Ceci nous paraît d'autant plus nécessaire qu'il est possible que certaines des transformations soient à l'origine de difficultés étudiantes.

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, lors d'activités expérimentales, aucune mesure n'est exempte d'incertitude, la précision des appareils employés étant toujours limitée. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces incertitudes dans le cas d'expérimentations quantitatives de manière à en restreindre l'impact sur les résultats.
Mais qu'est-ce que l'incertitude ? Voici plusieurs définitions :

- *paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées* (Joint Committee For Guides In Metrology, 2012) ;
- *paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande* (Ministère de l'éducation nationale de la jeunesse et de la vie associative, 2012) ;
- *intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie avec un niveau de confiance déterminé* (Bally & Berroir, 2010) ;

- *paramètre positif qui permet de définir un intervalle de valeurs « probables » de la grandeur M dans lequel on a 95% de chance de trouver la « valeur vraie ». On parle d'intervalle de confiance à 95%* (Biansan, Blat, Nicoules, & Olive, 2017) ;
- *paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs autour d'une valeur "moyenne" (pas forcément la moyenne arithmétique) d'un mesurande. Elle reflète l'impossibilité de connaître exactement la valeur du mesurande. De même que tout mesurage est entaché d'une erreur, tout mesurage est accompagné d'une incertitude, c'est-à-dire d'un doute sur la valeur mesurée*. (Schoefs, Buiron, & Favergeon, 2016).

Deux caractéristiques se retrouvent dans la plupart de ces définitions : l'association à la valeur de la mesure ou mesurande et le fait de refléter la dispersion par rapport à une valeur « vraie ». Cette dispersion est due, essentiellement, aux instruments de mesure utilisés. L'incertitude représente par conséquent l'estimation de l'écart maximal possible, vers le haut ou vers le bas, entre le résultat de la mesure et la valeur exacte de la grandeur mesurée. Cet écart indique le domaine de valeurs dans lequel la mesure se trouve et est appelé incertitude absolue (Figure 12).

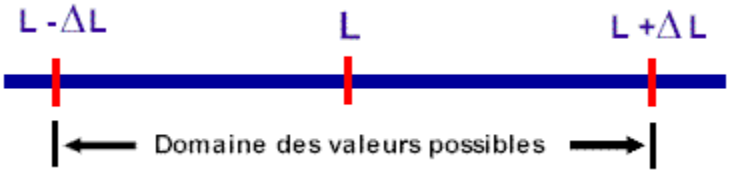


Figure 12 : Illustration de l'incertitude d'une mesure L [1][3]

L'incertitude absolue est normalement notée U(g) où g représente la grandeur mesurée. Cependant, la notation généralement employée est Δg, raison pour laquelle l'incertitude sur la longueur est notée ΔL dans la figure supra. Dans la suite de ce travail, la notation recommandée par le Bureau International des Poids et Mesures est utilisée.

Lors du report du résultat d'une mesure, il est donc nécessaire de faire apparaître la valeur de l'incertitude comme suit : x = valeur mesurée ± valeur de l'incertitude absolue (unité). Pour illustrer cela, prenons quelques exemples. La figure 13 (page ci-après) représente la mesure d'un objet à l'aide d'une latte. Cette dernière a une incertitude de 1 millimètre. La mesure doit donc être précise au millimètre près. On écrira la valeur de la mesure $x = 5{,}3 \pm 0{,}1\ \mathrm{cm}$ ou $x = 53 \pm 1\ \mathrm{mm}$.

[3] Les numéros entre crochets se rapportent aux références des images. Elles sont reprises dans la bibliographie, après les références scientifiques

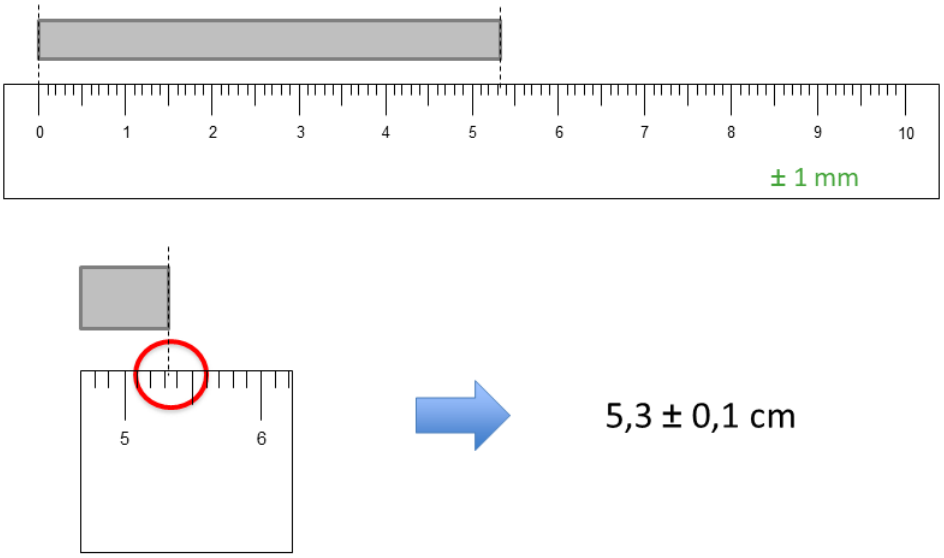


Figure 13 : Mesure d'une longueur avec une latte

La figure 14 représente la mesure d'une tension à l'aide d'un voltmètre. Sa fiche technique indique une incertitude de 0,5 volts. L'aiguille de cet appareil étant située entre les graduations 9 et 10, un scientifique peut interpoler la valeur de la mesure à 9,5. Cette dernière sera donc reportée comme suit : $\mathrm{U} = 9{,}5 \ \pm 0{,}5\ \mathrm{V}$.

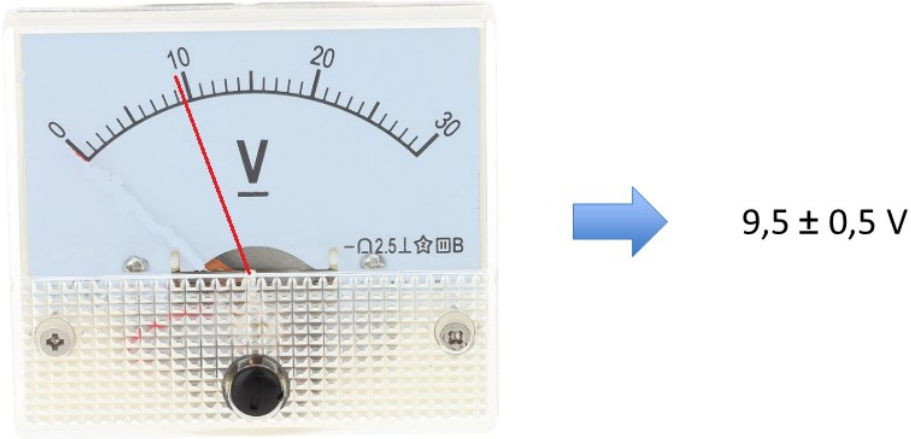


Figure 14 : Mesure d'une tension avec un voltmètre [2]

A partir de ces deux exemples, l'incertitude peut être redéfinie comme « la gamme de valeurs qu'une mesure peut avoir due aux paramètres de l'instrument. »

Cependant, la valeur de l'incertitude ne donne qu'une indication assez faible de la précision d'une mesure. En effet, une certaine incertitude sur une valeur importante est indicatif d'une précision élevée tandis que cette même incertitude sur une valeur beaucoup plus petite indique une mesure assez peu précise. Ainsi, une incertitude de 1 centimètre a moins d'influence si la distance mesurée est de 1 kilomètre que si cette

distance est de 5 centimètres. D'où la nécessité de définir l'incertitude relative. Il s'agit du rapport entre l'incertitude absolue et la mesure. Ce rapport est habituellement exprimé en pourcentage et est noté $\frac{\Delta m}{m}$ (Schoefs et al., 2016; Taylor, 2000; Vérot, n.d.). Dans la suite de ce travail, elle sera cependant notée $\frac{U(m)}{m}$, conformément aux recommandations du Bureau International des Poids et Mesures (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

Tout comme lors du report d'un résultat avec l'incertitude absolue, la transcription d'une valeur en tenant compte de l'incertitude relative se fait comme suit : x = valeur mesurée (unité) ± valeur de l'incertitude relative (%). Ainsi, la longueur de l'objet mesuré avec la latte à la figure 13 peut être notée $\mathrm{x} = 5{,}3\ \mathrm{cm}\ \pm 2\ \%$. La valeur de la tension mesurée avec le voltmètre de la figure 14 peut être reportée comme suit : $\mathrm{U} = 9{,}5\ \mathrm{V}\ \pm 5\ \%$.

Il arrive souvent que l'incertitude absolue comporte plus qu'un seul chiffre. C'est le cas, par exemple, de l'incertitude de la pipette jaugée représentée à la figure 15. Comment reporter la valeur du volume prélevé dans ce cas ?

- Figure 15 : Prélèvement d'un volume à l'aide d'une pipette jaugée

Avant de répondre à cette question, imaginons une résistance de valeur 7,3249 ohms avec une incertitude absolue de 0,02847 ohm.

Dans la plupart des cas, les scientifiques considèreront le premier chiffre non nul de l'incertitude comme indicatif de la précision de la valeur (Barwick, Magnusson, Örnemark, Patriarca, & Prichard, 2011; Skoog, West, & Holler, 1997; Taylor, 2000; Vérot, n.d.). Ils reporteront alors la valeur de la résistance comme suit : $R = 7{,}32\ \pm 0{,}03\ \Omega$.

Il arrive cependant qu'il faille utiliser d'autres méthodes permettant, dans certains cas, de garder plus de chiffres à l'incertitude. Ainsi, les chercheurs utilisent la règle suivante : Si le premier chiffre de l'incertitude est supérieur à 5, l'incertitude ne comporte qu'un seul chiffre. Si le premier chiffre de l'incertitude est strictement inférieur à 5, l'incertitude comporte deux chiffres (Bé, Blanchis, & Dulieu, 2004). Si cette règle est appliquée à l'exemple, le résultat sera reporté de la manière suivante : $R = 7{,}324 \ \pm 0{,}028\ \Omega$.
Il existe encore d'autres règles plus élaborées. En voici un exemple (Moreau, 2001)[4] :

- la suppression d'un chiffre significatif sur U(g) et l'arrondi correspondant ne doit pas entraîner pour cette incertitude une modification supérieure à 4 % (ou 5 % à la rigueur) ;
- la suppression d'un chiffre significatif sur g et l'arrondi correspondant ne doit pas entraîner une translation de l'intervalle de confiance supérieure à 0,2 U(g)

où g représente une grandeur. U(g) correspond donc à l'incertitude sur la grandeur.
Ainsi, pour déterminer la valeur de l'incertitude sur la résistance, il faut à chaque fois supprimer un chiffre et vérifier que cette suppression n'engendre pas une variation de l'incertitude supérieure à 4 % (Tableau 2).

Chiffres retirés à la valeur de l'incertitude (U(R)= 0,02847 Ω)	***Valeur de l'incertitude transformée et arrondie***	***Calcul du pourcentage de variation de l'incertitude***
7	0,0285 Ω	$\frac{\lvert 0{,}0285 - 0{,}02847 \rvert}{0{,}02847} . 100 = 0{,}1\ \%$
47	0,028 Ω	$\frac{\lvert 0{,}028 - 0{,}02847 \rvert}{0{,}02847} . 100 = 1{,}7\ \%$
847	0,03 Ω	$\frac{\lvert 0{,}03 - 0{,}02847 \rvert}{0{,}02847} . 100 = 5{,}4\ \%$

Tableau 2 : Calcul de la variation d'incertitude

Lorsque l'incertitude est réduite à un seul chiffre, la modification de l'incertitude est supérieure aux 4 % préconisés. Il faut donc garder deux chiffres à l'incertitude.
Pour déterminer le nombre de chiffres de la mesure, il est nécessaire de déterminer la valeur de 0,2 U(R). Elle vaut $0{,}2 . 0{,}028 = 0{,}0056\ \Omega$. Par la suite, il faut déterminer la variation engendrée par la suppression d'un chiffre à la valeur de la mesure. Cette variation doit être inférieure à 0,0056 Ω (Tableau 3, page ci-après).

[4] Dans cet article, l'auteur utilise la notation Δa pour mentionner l'incertitude absolue d'une grandeur. Cette notation a été transformée pour correspondre aux recommandations du Bureau International des Poids et Mesures

Valeur de la mesure	***Valeur transformée et arrondie***	***Variation de la mesure***
7,3249 Ω	7,325 Ω	$\lvert 7{,}325 - 7{,}3249 \rvert = 0{,}0001\ \Omega$
	7,32 Ω	$\lvert 7{,}32 - 7{,}3249 \rvert = 0{,}0049\ \Omega$
	7,3 Ω	$\lvert 7{,}3 - 7{,}3249 \rvert = 0{,}0249\ \Omega$

Tableau 3 : Calcul de la variation de la mesure

Lorsque la mesure ne comporte plus que deux chiffres, la variation de la mesure est supérieure à 0,0056. La mesure s'écrira donc avec trois chiffres : $R = 7{,}32\ \pm 0{,}028\ \Omega$.
Ainsi, lors du report du volume prélevé avec la pipette jaugée de 5 millilitres ayant une incertitude de 0,022 millilitre (Figure 15), la valeur du volume prélevé pourra être reporté $V = 5{,}00\ \pm 0{,}02\ mL$ ou $V = 5{,}00\ \pm 0{,}022\ mL$ suivant la règle employée.

2.1.2. L'incertitude liée à un appareil de mesure

Maintenant que la façon de reporter un résultat en fonction de son incertitude a été établie, la question de la façon dont est déterminée l'incertitude absolue d'un appareil de mesure peut être posée.
Comme mentionné précédemment, l'incertitude caractérise la dispersion des mesures. Elle correspond en fait à un intervalle de confiance dans lequel il y a une forte probabilité de retrouver la valeur de la mesure. Pour déterminer cet intervalle de confiance, il faut se baser sur certaines analyses statistiques. Lorsque les mesures sont répétées un grand nombre de fois, elles se répartissent selon une courbe de Gauss (Figure 16, page ci-après) (Bally & Berroir, 2010; Ministère de l'éducation nationale de la jeunesse et de la vie associative, 2012; Schoefs et al., 2016; Skoog et al., 1997; Taylor, 2000).
L'équation correspondant à cette courbe est la suivante :

$$y = \frac{1}{\sigma.\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)^2\right)$$

où σ désigne l'écart-type ;
$\bar{x}$ désigne la moyenne.

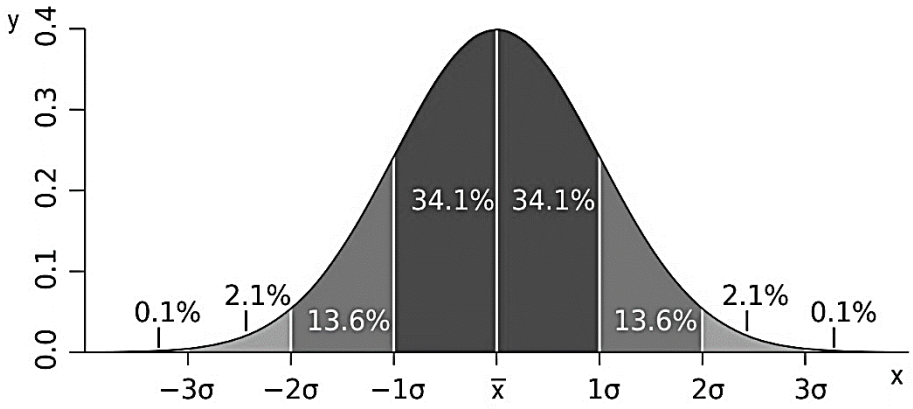


Figure 16 : Courbe de Gauss (d'après Doyen G., 2012) [3]

L'écart-type représente la largeur de la courbe. Il donne une idée de la dispersion des mesures et se définit comme la moyenne quadratique des écarts par rapport à la moyenne :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N} (x - \bar{x})^2}$$

où N désigne le nombre de mesures.

L'écart-type dépend donc du nombre de mesures. Si ce nombre est suffisamment important, il y a une probabilité de 68 % que la valeur soit située dans l'intervalle $[\bar{x} - \sigma\ ;\ \bar{x} + \sigma]$ et de 95 % qu'elle soit dans l'intervalle $[\bar{x} - 2\,\sigma\ ;\ \bar{x} + 2\,\sigma]$. La moyenne des valeurs est alors considérée comme la meilleure estimation que l'on ait de la « vraie » valeur, de la valeur qui aurait été obtenue s'il n'y avait pas d'incertitude. Mais est-ce le cas ? La moyenne $\overline{x_1}$ qui serait obtenue en refaisant les mesures ne serait pas exactement la même que $\bar{x}$ mais en serait proche. En réitérant les mesures plusieurs fois et en en calculant les moyennes $\overline{x_2}$, $\overline{x_3}$, … $\overline{x_i}$, une nouvelle distribution correspondant à une courbe de Gauss est obtenue. La figure 17 (page ci-après) montre les deux graphiques : la courbe en trait pointillé représente la distribution des valeurs mesurées et celle en trait plein la distribution des moyennes. Cette dernière présente une dispersion plus faible que la distribution des valeurs mesurées et est elle aussi centrée sur la moyenne $\bar{x}$ que l'on considèrera dès lors comme la meilleure estimation de la valeur « vraie » X. L'écart-type de cette seconde courbe est appelé écart-type à la moyenne et permet de quantifier l'incertitude-type. Elle se calcule de la manière suivante :

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

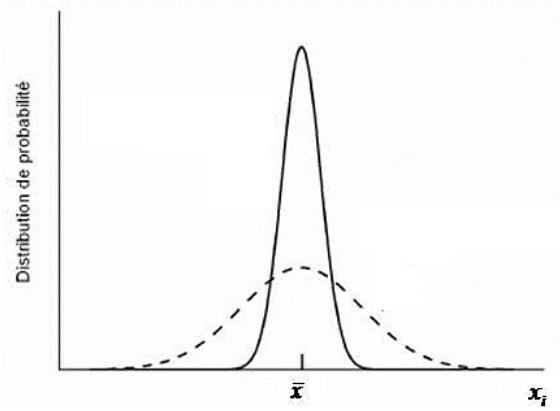


Figure 17 : Distribution des valeurs mesurées et des valeurs moyennes (d'après Schoefs et al., 2016) [4]

En général, en sciences, les mesures sont répétées et moyennées. L'incertitude sur ces mesures est déterminée sur base de l'incertitude-type. Tout comme pour la courbe de distribution des mesures, il y a une probabilité, respectivement, de 68 % et de 95 % que la valeur se trouve dans les intervalles $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}\ ;\ \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ et $[\bar{x} - 2\,\sigma_{\bar{x}}\ ;\ \bar{x} + 2\,\sigma_{\bar{x}}]$. Ces intervalles, fonction de la probabilité, sont appelés intervalles de confiance.

Pour obtenir cette courbe de Gauss, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre de mesures. Si, au contraire, le nombre de mesures n'est pas suffisant, la distribution des valeurs ne respectera pas exactement la courbe de Gauss et il sera nécessaire de tenir compte d'un facteur correctif appelé le coefficient de Student. Ce dernier dépend du nombre de mesures et de l'intervalle de confiance souhaité. Ainsi :

$$U(x) = t_{N,intervalle\ de\ confiance} \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

Ce sont ces incertitudes qui sont référencées sur les appareils de mesure ou pièces de verrerie.

2.1.3. Propagation des incertitudes

Lors d'une recherche expérimentale, il est nécessaire d'associer les incertitudes provenant de différentes mesures. En effet, les mesures prises sont, en général, combinées au travers de diverses opérations pour obtenir des résultats.

Imaginons un nombre N de mesures m_1, m_2, m_3, … m_i possédant respectivement une incertitude $U(m_1)$, $U(m_2)$, $U(m_3)$, … $U(m_i)$. Généralement, lors d'une somme et/ou d'une différence de ces mesures, il suffit de sommer les incertitudes absolues individuelles de chacune d'entre elles pour déterminer l'incertitude sur le résultat :

$$U(x) = U(m_1) + U(m_2) + \cdots + U(m_i) + \cdots + U(m_N) = \sum_{i=1}^{N} U(m_i)$$

Pour déterminer l'incertitude sur le résultat de multiplications et/ou de divisions, nous en sommons les incertitudes relatives :

$$\frac{U(x)}{x} = \frac{U(m_1)}{m_1} + \frac{U(m_2)}{m_2} + \cdots + \frac{U(m_i)}{m_i} + \cdots + \frac{U(m_N)}{m_N} = \sum_{i=1}^{N} \frac{U(m_i)}{m_i}$$

Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de surestimer la valeur réelle de l'incertitude.

Voici la valeur que prendrait x si toutes les mesures étaient sous-estimées de leur incertitude respective :

$$x = \sum_{i=1}^{N} m_i - \sum_{i=1}^{N} U(m_i)$$

Voici la valeur que prendrait x si toutes les mesures étaient sur-estimées de leur incertitude respective :

$$x = \sum_{i=1}^{N} m_i + \sum_{i=1}^{N} U(m_i)$$

Ces deux cas extrêmes sont fort peu probables. En effet, de manière générale, certaines incertitudes seront compensées par d'autres. Pour comprendre cela d'un point de vue statistique, il faut se rappeler que les mesures, lorsqu'elles sont répétées, se répartissent selon une courbe de Gauss, tout comme les moyennes de ces mesures. Il y a donc une incertitude-type associée à chacune de ces mesures. La somme ou la soustraction de ces gaussiennes engendre une nouvelle gaussienne obtenue en faisant le produit de convolution des gaussiennes de chacune des mesures (Figure 18, page ci-après).

L'écart-type de cette nouvelle gaussienne ne vaut pas la somme des écart-types de ses composantes mais correspond à la racine carrée de la somme quadratique des écart-types des autres gaussiennes. Ainsi, l'incertitude absolue d'un résultat obtenu en faisant la somme ou la différence de mesures s'écrit :

$$U(x) = \sqrt{U^2(m_1) + U^2(m_2) + \cdots + U^2(m_i) + \cdots + U^2(m_N)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} U^2(m_i)}$$

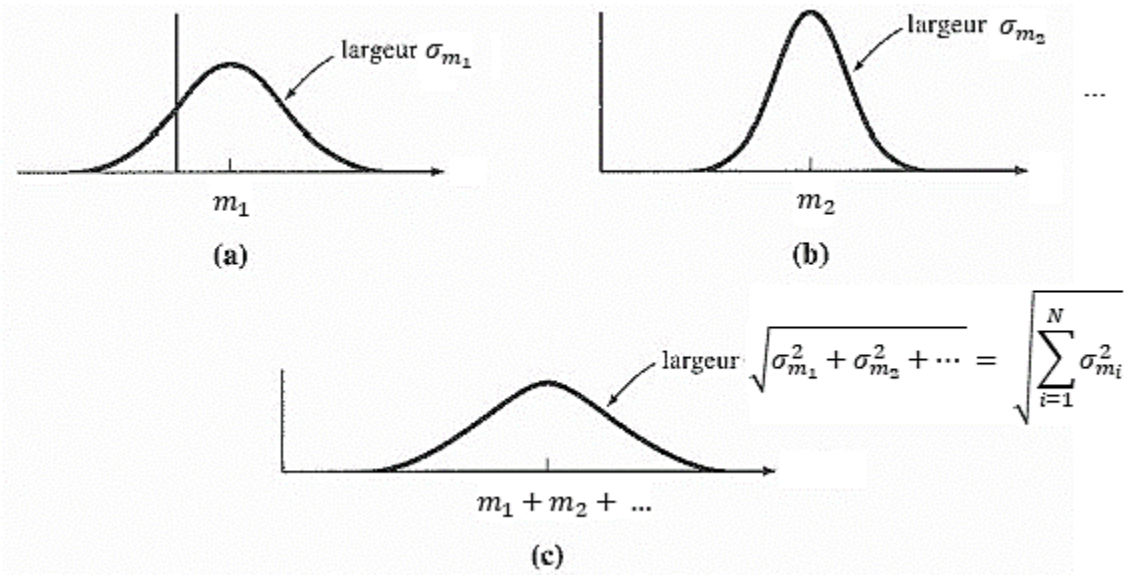


Figure 18 : Somme de plusieurs courbes de Gauss (d'après Taylor, 2000)

De la même manière, l'incertitude relative d'un résultat obtenu suite au produit ou au quotient de mesures :

$$\frac{U(x)}{x} = \sqrt{\left(\frac{U(m_1)}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{U(m_2)}{m_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{U(m_i)}{m_i}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{U(m_N)}{m_N}\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{U(m_i)}{m_i}\right)^2}$$

Cependant, lors de calculs, nous ne sommes pas exclusivement confrontés à des sommes, différences, produits et quotients mais aussi à des fonctions plus élaborées telles que des fonctions trigonométriques, exponentielles, logarithmiques, … Toutes ces fonctions peuvent être représentées graphiquement. La figure 19 représente la fonction racine carrée :

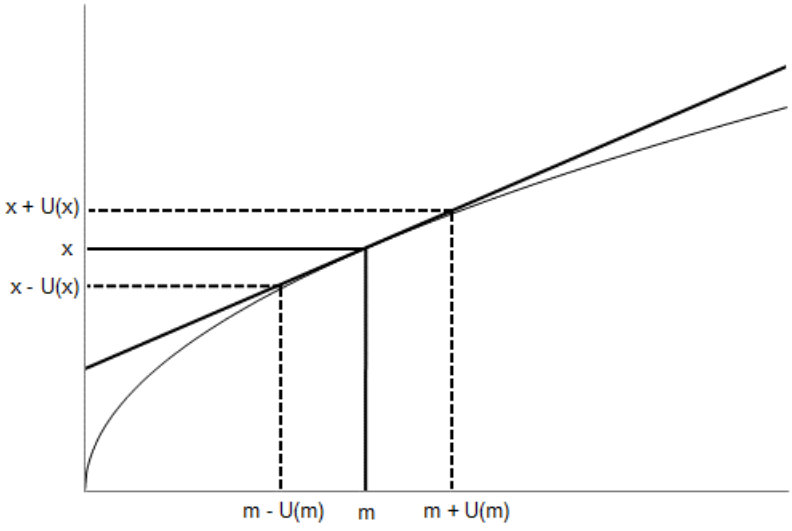


Figure 19 : Graphe représentant la fonction racine carrée et une de ses tangentes

L'équation de cette fonction est la suivante : $x = \sqrt{m}$. Il s'agit d'une fonction à une seule variable : m. L'incertitude représente la variation que l'on peut avoir sur la valeur de la mesure. Ainsi, la valeur de m est comprise dans l'intervalle $[m - U(m)\,; m + U(m)]$. La fonction dans cet intervalle apparaît comme une droite dont la pente serait donnée par $U(x)/U(m)$. Si l'incertitude sur la mesure $U(m)$ est suffisamment petite, cette pente se trouve être la pente de la tangente au point m, ce qui correspond à la valeur de la dérivée de la fonction au point m :

$$\frac{U(x)}{U(m)} = \frac{dx}{dm}$$

Ainsi,

$$U(x) = \frac{dx}{dm}\,.U(m)$$

Si la pente est positive, la valeur de l'incertitude $U(x)$ est positive. Par contre, si la pente est négative, cela donne une incertitude négative. L'incertitude d'une fonction est donc donnée par :

$$U(x) = \left|\frac{dx}{dm}\right|\,.U(m)$$

Bien entendu, si la fonction possède plusieurs variables, implique plusieurs mesures, l'incertitude dépendra des dérivées partielles de la fonction par rapport à chacune de ces mesures :

$$U(x) = \left|\frac{\partial x}{\partial m_1}\right|.U(m_1) + \left|\frac{\partial x}{\partial m_2}\right|.U(m_2) + \cdots + \left|\frac{\partial x}{\partial m_i}\right|.U(m_i) + \cdots + \left|\frac{\partial x}{\partial m_N}\right|.U(m_N)$$
$$= \sum_{i=1}^{N}\left|\frac{\partial x}{\partial m_i}\right|.U(m_i)$$

Chacun des termes de cette somme représente l'incertitude de la fonction par rapport à l'une des mesures. Cependant, lorsque les incertitudes sont sommées, l'incertitude du résultat est sur-estimée. Pour éviter cela, il est nécessaire de déterminer cette incertitude en faisant la racine carrée de la somme quadratique des différentes incertitudes :

$$U(x) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial m_1}.U(m_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial m_2}.U(m_2)\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial x}{\partial m_i}.U(m_i)\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial x}{\partial m_N}.U(m_N)\right)^2}$$
$$= \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial x}{\partial m_i}.U(m_i)\right)^2}$$

2.1.4. Retranscription de résultats avec la précision adéquate

La méthode, qui sera qualifiée d'« experte » dans la suite de ce travail, permettant de retranscrire un résultat avec la précision adéquate doit suivre les étapes suivantes :

1. Détermination des incertitudes absolues et/ou relatives de chacune des valeurs impliquées dans le calcul
2. Détermination de l'incertitude absolue et/ou relative sur le résultat
3. Détermination de l'incertitude absolue sur le résultat si l'incertitude obtenue à l'étape précédente est relative
4. Ecriture du résultat sur base de son incertitude absolue

1er exemple : Conversion d'une hauteur de colonne d'eau (mm) en pression (Torr) (= hauteur de la colonne de mercure qui exerce la même pression que cette colonne d'eau) :

$$P = \frac{h}{d} = \frac{62}{13{,}6} = 4{,}5588235 \ldots \, Torr$$

1. Détermination des incertitudes absolues et relatives de chacune des données

$$U(h) = 1\ mm \ \Rightarrow \ \frac{U(h)}{h} = \frac{1}{62}\ .100 = 2\ \%$$

$$U(d) = 0{,}1 \ \Rightarrow \ \frac{U(d)}{d} = \frac{0{,}1}{13{,}6}.100 = 0{,}7\ \%$$

2. Détermination de l'incertitude relative du résultat

$$\frac{U(P)}{P} = \sqrt{\left(\frac{U(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{U(d)}{d}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{62}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{13{,}6}\right)^2} = 0{,}017726 \ldots = 0{,}02 = 2\ \%$$

Etant donné que le nombre de valeurs impliquées dans le calcul est petit, il n'est pas nécessaire de prendre la racine carrée de la somme quadratique. La somme des incertitudes relatives donne peu ou prou le même résultat :

$$\frac{U(P)}{P} = \frac{U(h)}{h} + \frac{U(d)}{d} = \frac{1}{62} + \frac{0{,}1}{13{,}6} = 0{,}023481 \ldots = 0{,}02 = 2\ \%$$

3. Détermination de l'incertitude absolue sur le résultat

$$U(P) = \left(\frac{U(P)}{P}\right)^{5}.P = \ 0{,}02\ .\ 4{,}5588 \ldots = 0{,}1\ torr$$

Le résultat devra donc être précis au dixième.

[5] $\frac{U(P)}{P}$ représente l'incertitude relative

4. Ecriture de la valeur

$$P = \frac{62}{13{,}6} = 4{,}6 \ \pm 0{,}1\ Torr$$

2eme exemple : Calcul de l'aire d'un rectangle de longueur $L = 54{,}0 \ \pm 0{,}1\ m$ et une largeur $l = 25{,}3 \ \pm 0{,}1\ m$:

$$A = 54{,}0\ .\ 25{,}3 = 1366{,}2\ m^2$$

1. Détermination des incertitudes relatives de chacune des données

$$\frac{U(L)}{L} = \frac{0{,}1}{54{,}0}.100 = 0{,}2\ \% \qquad \frac{U(l)}{l} = \frac{0{,}1}{25{,}3}.100 = 0{,}4\ \%$$

2. Détermination de l'incertitude relative sur le résultat

$$\frac{U(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{U(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0{,}1}{54{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{25{,}3}\right)^2} = 4{,}3648 \ldots . 10^{-3} = 0{,}4\ \%$$

De nouveau, le nombre de valeurs étant impliquées dans le calcul est suffisamment petit pour pouvoir approximer l'incertitude du résultat à la somme des incertitudes relatives :

$$\frac{U(A)}{A} = \frac{U(L)}{L} + \frac{U(l)}{l} = 0{,}2 + 0{,}4 = 0{,}6\ \%$$

La valeur d'incertitude obtenue n'est pas tout à fait la même mais présente un ordre de grandeur équivalent

3. Calcul de l'incertitude absolue sur le résultat

En tenant compte de l'incertitude relative obtenue par la racine carrée de la somme quadratique des incertitudes relatives individuelles :

$$U(A) = \frac{0{,}4}{100}\ .1366{,}2 = 6\ m^2$$

En tenant compte de l'incertitude relative obtenue par la somme des incertitudes relatives individuelles :

$$U(A) = \frac{0{,}6}{100}\ .1366{,}2 = 8\ m^2$$

Ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur. Le résultat doit être précis à l'unité.

4. Ecriture de la valeur

$$A = 54{,}0\ .\ 25{,}3 = 1366 \ \pm 6\ ou\ 8\ m^2$$

3eme exemple : Calcul du périmètre d'un rectangle de longueur $L = 54{,}0\ \pm 0{,}1\ m$ et une largeur $l = 25{,}3\ \pm 0{,}1\ m$:

$$P = 2.(54{,}0 + \ 25{,}3) = 158{,}6\ m$$

1. Détermination des incertitudes absolues de chacune des données

$$U(L) = 0{,}2\ m \qquad\qquad U(l) = 0{,}1\ m$$

2. Détermination de l'incertitude absolue sur le résultat

$$U(P) = \sqrt{2\ .U^2(L) + 2\ .U^2(l)} = \sqrt{2\ .0{,}1^2 + 2\ .0{,}1^2} = 0{,}2\ m$$

   Si nous approximons l'incertitude du résultat à la somme des incertitudes absolues :

$$U(P) = 2\ .U(L) + 2\ .U(l) = 2\ .0{,}1 + 2\ .0{,}1 = 0{,}4\ m$$

   La valeur d'incertitude obtenue n'est pas tout à fait la même mais présente un ordre de grandeur équivalent. Le résultat doit avoir une précision au dixième.

3. Ecriture de la valeur

$$P = 2.(54{,}0 + \ 25{,}3) = 158{,}6 \pm 0{,}2\ ou\ 0{,}4\ m$$

Cette méthode étant assez longue, il n'est pas rare d'employer des méthodes simplifiées.

2.2. Autres méthodes

Une de ces méthodes consiste à considérer l'incertitude absolue ou relative la plus importante comme égale à celle du résultat (Skoog et al., 1997). Si nous reprenons l'exemple de la conversion d'une hauteur de colonne d'eau en pression, la valeur présentant l'incertitude relative la plus importante est la hauteur de la colonne d'eau. Si nous considérons cette incertitude comme égale à celle du résultat, l'incertitude absolue du résultat devient :

$$U(P) = \frac{U(h)}{h}.P = \frac{1}{62}\ .4{,}5588235\ \ldots = 0{,}0735\ \ldots = 0{,}07\ Torr$$

Le résultat doit être précis au centième :

$$P = \frac{62}{13{,}6} = 4{,}56\ Torr$$

Pour rappel, la méthode non issue d'une simplification donne un résultat précis au dixième. Comme attendu, cette manière de faire sous-estime l'incertitude ce qui engendre une sur-estimation de la précision.

Il est aussi courant d'employer des règles (Hecht, 2000; Skoog et al., 1997; Sternheim & Kane, 1991; Tro, 2015; Young & Geller, 2006) telles que :

- *Le résultat d'une addition et/ou d'une soustraction compte autant de décimales que le terme du calcul qui en comporte le moins.*
- *Le résultat d'une multiplication et/ou d'une division compte autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul qui en comporte le moins.*

En lisant ces règles, nous remarquons une notion qui n'apparaît pas lors de l'utilisation de la méthode experte : la notion de chiffre significatif. Ainsi, ce que nous appelons couramment « chiffre significatif » n'existe pas dans le langage « expert ». Il s'agit d'une construction didactique utilisée exclusivement à des fins d'enseignement.

Si on applique ces règles aux deux exemples précédents :

- Conversion d'une hauteur de colonne d'eau (mm) en pression (Torr) :

$$P = \frac{h}{d} = \frac{62}{13{,}6} = 4{,}5588235 \ldots = 4{,}6\, Torr$$

- Calcul de l'aire d'un rectangle de longueur $L = 54{,}0\, m$ et une largeur $l = 25{,}3\, m$:

$$A = 54{,}0\,.\,25{,}3 = 1366{,}2 = 1{,}37.\,10^3\, m^2$$

- Calcul du périmètre d'un rectangle de longueur $L = 54{,}0\, m$ et une largeur $l = 25{,}3\, m$:

$$P = 2.\,(54{,}0 + 25{,}3) = 158{,}6\, m$$

L'application de ces règles ne donne pas toujours le même résultat que par la méthode experte. Lors des additions et soustractions, tenir compte du nombre de décimales de la valeur en présentant le moins revient à ne considérer que l'incertitude absolue la plus importante. Dans le cas des multiplications et divisions, ne regarder que la valeur possédant le nombre de chiffres significatifs le moins important revient peu ou prou à ne prendre en compte que l'incertitude relative la plus importante. En effet, l'incertitude relative sera d'autant plus grande que la valeur de la mesure comportera peu de chiffres significatifs.

$$Incertitude\ relative = \frac{U(x)}{x}$$

Pour comprendre cela, imaginons x une mesure possédant un certain nombre de chiffres significatifs. Cette mesure a une incertitude relative donnée. En diminuant le nombre de chiffres significatifs de la mesure, la valeur de la mesure diminue et l'incertitude absolue augmente. Cela engendre une augmentation de l'incertitude relative.

Prenons comme exemple la pesée d'une masse de 6,489 g avec une balance précise au milligramme. L'incertitude relative sur cette valeur est de 2.10^{-2} % :

$$\frac{U(m)}{m} = \frac{0{,}001}{6{,}489}.100 = 2\,.\,10^{-2}\ \%$$

Si un chiffre est retiré à la masse, l'incertitude absolue ne sera plus de l'ordre du milligramme mais du centigramme. Cela engendrera une augmentation de l'incertitude relative :

$$\frac{U(m)}{m} = \frac{0{,}01}{6{,}49}.100 = 0{,}2\ \%$$

Les deux méthodes présentées proviennent toutes les deux de transformations de la méthode experte. Elles sont issues de transpositions didactiques. En ce qui concerne plus particulièrement l'emploi des règles, les transformations sont les suivantes :

- ne tenir compte de l'incertitude absolue ou relative que d'une seule des valeurs du calcul ;
- estomper le lien avec l'incertitude absolue ou relative des mesures ;
- mettre en place une nouvelle notion, celle de chiffre significatif.

2.3. Méthodes et difficultés des étudiants lors de la retranscription d'un résultat avec la précision adéquate

Malgré leur facilité d'emploi, les règles de calcul issues de la transposition didactique présentent quelques inconvénients. Elles :

- peuvent être mal interprétées par manque de signification ;
- sont parfois ignorées lors des activités expérimentales car elles ont été présentées dans le cadre d'un cours théorique ;
- ne sont pas appliquées du fait du nombre de concepts impliqués dans les activités expérimentales.

En effet, lors des activités expérimentales, les étudiants doivent utiliser un grand nombre d'éléments d'ordre matériels, techniques, conceptuels, … Il leur est alors difficile de faire appel aux règles lorsqu'il s'agit de les appliquer à cause de la charge cognitive engendrée par l'activité (Paas, Renkl, & Sweller, 2004; Tuovinen & Sweller, 1999).

Une autre difficulté ressentie par les étudiants concerne la construction didactique qu'est la notion de « chiffre significatif ». Beaucoup d'articles (Clase, 1993; Guare, 1991; Guymon, James, & Seager, 1986; Pacer, 2000; Zipp, 1992) s'en sont emparés pour souligner une difficulté d'apprentissage et/ou décrire une méthode d'enseignement de

cette notion ou des règles de calcul. Les difficultés liées à cette matière sont les suivantes :

- les appareils de mesure électroniques affichent un grand nombre de chiffres, ce que les étudiants ne remettent pas en doute ;
- la calculatrice affiche soit trop de chiffres dans le cas de nombres comportant beaucoup de décimales, soit pas assez dans le cas de nombres finis ;
- en sciences, les zéros sont parfois significatifs ou non suivant la précision du matériel utilisé alors qu'en mathématiques, un zéro repris dans un nombre a une signification différente ;
- …

Pour pallier à certaines incompréhensions liées à la notion de chiffre significatif, Pacer (2000) et Zipp (1992) proposent tous deux de prendre une ou plusieurs pièces de verrerie de précision différente, de mettre de l'eau dedans et de demander à plusieurs étudiants de déterminer la valeur du volume d'eau dans chacune des pièces sans oublier de mentionner l'incertitude. S'ensuit une comparaison des valeurs reportées et une discussion autour de sujets tels que la précision des pièces de verrerie, les chiffres significatifs, la façon de reporter des résultats, …

Stephenson (2009) propose une méthode non expérimentale : la « Box-and-dot method ». Cette méthode implique d'encadrer les chiffres situés entre les éventuels zéros ainsi que les zéros situés à droite lorsque le nombre est décimal. Pour déterminer le nombre de chiffres significatifs, il suffit alors de compter le nombre de chiffres dans les cadres. Si nous imaginons un nombre dans lequel les X représentent tous un chiffre non nul, les chiffres à encadrer sont les X et les zéros situés à droite comme montré à la figure 20.

000,00 | XXXXX | 000

Figure 20 : Box-and-Dot method

En ce qui concerne les règles d'écriture des résultats, il y a aussi différentes méthodes proposées. Par exemple, Svensson (2004) propose un apprentissage progressif des règles. Il commence par enseigner la règle à employer lors des multiplications et divisions. Vient ensuite la règle à appliquer dans les additions et soustractions. Il termine par une méthode qui, selon lui, est suffisante pour les étudiants terminant leurs études et les chercheurs. Il s'agit de sommer les incertitudes absolues ou relatives suivant le type d'opération effectuée et de retranscrire le résultat sur base de l'incertitude obtenue. Il est quand-même conscient que cette dernière méthode engendre une sur-estimation de l'incertitude.

Guymon et al.(1986) débutent leur séance de cours par une mise en situation ressemblant à celle de Pacer (2000) et Zipp (1992) mais avec des différents rectangles de couleur. Ils demandent à leurs étudiants de déterminer la longueur et la largeur de chacun des rectangles à l'aide d'une règle précise au centimètre et de calculer leur périmètre et leur aire. Les encadrants posent alors des questions portant sur la précision des valeurs obtenues. Ils en viennent à donner du sens aux règles employées lors des différentes opérations pour transcrire les résultats avec la précision adéquate.

Clase (1993) présente une méthode basée sur le calcul écrit pour employer les règles susmentionnées. Il rajoute des chiffres à la fin des nombres sous forme de points d'interrogation qu'il appelle « inconnus ». Dans le cas des additions et soustractions, il ajoute des inconnus de manière à ce que tous les nombres présentent le même nombre de décimales. Il exécute le calcul écrit en mettant, dans le résultat, des inconnus quand un ou des points d'interrogations interviennent. Pour ce qui est des multiplications et divisions, les inconnus remplacent les zéros qui seraient présents lors du passage de l'écriture scientifique en écriture décimale. De nouveau, il effectue le calcul écrit en tenant compte des points d'interrogations (Figure 21).

Pour les additions et soustractions :

$x = 1{,}340 + 2{,}8.10^{-3} + 0{,}78523 = \ ...$

	1,	3	4	0	?	?
	0,	0	0	2	8	?
+	0,	7	8	5	2	3
	2,	1	2	8	0	3
→	2,	1	2	8	?	?

$x = 2{,}128$

Même nombre de décimales que la valeur la moins précise

Pour les multiplications et divisions :

$x = 1{,}64.10^{4}\,.\,2{,}4.10^{2} = \ ...$

			1	6	4	?	?
x					2	4	?
			?	?	?	?	?
		6	5	6	?	?	
+	3	2	8	?	?		
	3	9	3	6			
→	3	9	?	?	?	?	?

$x = 3{,}9.10^{6}$

Même nombre de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le moins

Figure 21 : Méthode basée sur le calcul écrit pour écrire le résultat d'un calcul avec la précision adéquate

Ces différentes méthodes et/ou propositions laissent deviner la principale difficulté liée à l'emploi des règles : leur manque de sens. En effet, y aurait-il besoin de concevoir différentes approches pour aider les étudiants à les appliquer si ce n'était pas le cas ? De plus, ce manque apparaît à différents niveaux et pas seulement à celui des règles. Parfois, ce sont même les notions liées à ces règles qui font défaut à l'exemple de celle de chiffre significatif (Pacer, 2000; Stephenson, 2009; Zipp, 1992).

Dans le même ordre d'idée, il faut aussi souligner l'ambiguïté du terme « décimale » employé dans la règle à appliquer lors d'opérations d'addition et de soustraction. Ce dernier est souvent compris comme n'incluant que les chiffres après la virgule dans un nombre décimal. Il laisse donc sous-entendre que la règle ne s'applique que si les valeurs expérimentales sont des nombres décimaux avec une virgule. Or, cela n'est pas toujours le cas. Certaines mesures peuvent être entières ou précises à la dizaine, centaine, … Tout dépend de l'unité de l'instrument utilisé. Dans la règle, « décimale » est utilisé comme synonyme du mot « précision ». Ce dernier est alors à comprendre comme l'ordre de grandeur du premier chiffre non nul de l'incertitude absolue sur la valeur à retranscrire. En vérité, la définition même du nom « décimale » ne fait pas appel à la virgule mais à un système de numérotation en base dix. Un nombre décimal est un « *nombre formé par une suite de chiffres pris entre 0 et 9, et qui chacun représente des puissances entières successives de dix* » (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012a). Il ne faut donc normalement pas le comprendre comme un chiffre après la virgule. Imaginons un nombre en notation scientifique $2{,}56.10^5$. Ce nombre peut aussi être écrit 256.10^3. En lecture littérale, ce nombre se lira deux-cents cinquante-six fois dix à la puissance trois. Le chiffre « 3 » correspond à la puissance entière de dix. La précision de ce nombre est à 10^3 c'est-à-dire au millier. Il est évident qu'il faut appliquer ce même raisonnement aux nombres entiers. Par exemple, 47 peut être écrit 47.10^0. Le 10^0 signifie une précision à l'unité.

Mais le concept de décimale n'est pas le seul qui soit ambigu. Le terme « précision » peut l'être tout autant. En réalité, ce terme n'existe pas en métrologie. Pourtant, en sciences expérimentales, il est généralement mis en lien avec l'incertitude de mesure. Une valeur possédant une grande incertitude présente une faible précision et vice-versa. La « précision » correspond donc au rang du dernier chiffre de la valeur. Par exemple, 12,3 a une précision de l'ordre du dixième, 6.10^3, une précision de l'ordre du millier, … Pourtant, le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (2012b) définit ce mot comme « *Caractère de ce qui est exact, calculé, mesuré de manière précise* ». Apparaît un lien avec l'exactitude de la mesure. Les auteurs surenchérissent lorsqu'ils en viennent à parler d'appareil ou d'instrument de précision « *Appareil, instrument caractérisé par son*

aptitude à donner des indications très voisines de la valeur vraie de la grandeur à mesurer ». La précision serait donc synonyme de ce qui est appelé « exactitude » en sciences expérimentales. Si le Larousse (n.d.) est consulté, la définition est quelque peu différente : « *Qualité globale d'une mesure ou d'un instrument capable de donner à très peu près le même résultat lorsqu'on répète plusieurs fois la même mesure* ». Dans ce cas-ci, le mot précision aurait plutôt pour synonyme le terme « fidélité ». Mais d'où vient cette ambiguïté ? On peut se demander si elle ne proviendrait pas de la langue anglaise. Le Bureau International des Poids et Mesures propose la définition suivante pour le terme « precision » en anglais : « *Closeness of agreement between indications or measured quantity values obtained by replicate measurements on the same or similar objects under specified conditions* » (Joint Committee For Guides In Metrology, 2012). En langue française, il s'agit de l'« *étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées.* » (Joint Committee For Guides In Metrology, 2012). Le terme « precision » anglais se traduit non pas par « précision » mais par « fidélité ». Il s'avère nécessaire de lever cette ambiguïté pour parler de précision, auquel cas les étudiants pourraient se méprendre sur les objectifs poursuivis.

Une autre difficulté liée à cet enseignement est liée à l'emploi du vocabulaire propre aux activités expérimentales. Lors de la lecture des appareils de mesure ou de pièces de verrerie, il est nécessaire, pour déterminer la précision de la valeur lue, de connaître l'incertitude absolue de l'appareil. Cependant, il apparaît que la plupart des étudiants en première année d'études universitaires ont des difficultés à s'approprier et, par conséquent, à appliquer certaines notions transversales telles que « incertitude » et « erreur ». Divers facteurs peuvent expliquer les difficultés à utiliser correctement ces notions (Barchiesi, 2004; Evangelinos, Psillos, & Valassiades, 2002; Guare, 1991; Le Maréchal & Rym, 2008; Munier, Chesnais, & Molvinger, 2014) comme, par exemple, la croyance que les notions d'incertitude et d'erreur sont similaires ou qu'il existe une « vraie » valeur, celle donnée par l'encadrant.

Nous pensons également que l'ordre dans lequel les sujets sont généralement présentés peut aussi être à l'origine de difficultés lors de la retranscription d'un résultat avec une précision adéquate. En fait, un certain nombre de livres de références de chimie et de physique (Atkins & Jones, 2007; Hecht, 1999, 2000; McQuarrie & Rock, 2007; Mendham, Denney, Barnes, & Thomas, 2006; Skoog et al., 1997; Sternheim & Kane, 1991; Tro, 2015; Young & Freedman, 2004; Young & Geller, 2006) proposent une méthode pour dénombrer les chiffres significatifs avant d'énoncer les règles, ce qui ne

laisse pas d'entraîner certaines confusions dans l'esprit des apprenants, l'écriture du résultat d'une addition ou d'une soustraction ne requérant pas d'y faire appel.

Lors de notre étude sur la manière dont les étudiants appliquent les règles lors des prises de mesures et le report des résultats expérimentaux, il est indispensable de tenir compte de toutes ces difficultés recensées :

- la non application des règles lors des activités expérimentales du fait de leur présentation dans le cadre d'un cours théorique ;
- l'affichage de valeurs sur les appareils ou la calculatrice sans prise en compte des incertitudes de mesure ;
- le manque de sens des règles ;
- l'ambiguïté de certains termes, notamment ceux de décimale et de précision ;
- le manque de signification de la notion de chiffre significatif ou du chiffre zéro.

En plus des éléments supra, il arrive que les étudiants commettent une erreur qui ne concerne pas directement la précision mais plutôt l'exactitude : l'erreur d'arrondi.

2.4. Les méthodes d'arrondi

Une fois l'incertitude déterminée ou les règles mentionnées précédemment employées, il est souvent nécessaire d'arrondir la valeur obtenue. Il existe, pour cela, deux manières d'arrondir. La première est l'arrondi arithmétique. Si le chiffre suivant le chiffre à arrondir est entre 0 et 4, il faut arrondir en-dessous. Par contre, si le chiffre suivant le chiffre à arrondir est entre 5 et 9, il faut arrondir au-dessus (Figure 22).

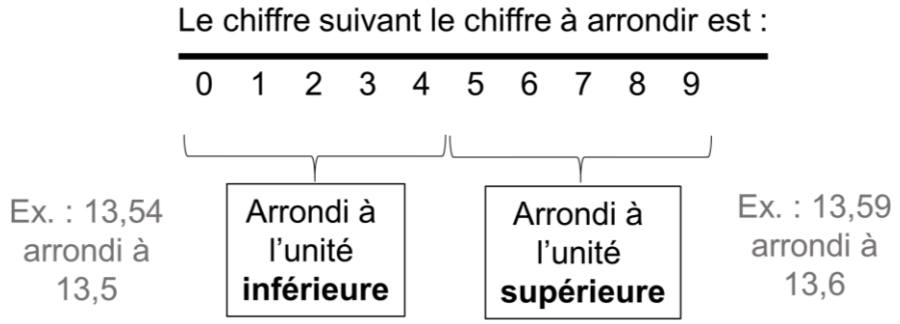


Figure 22 : Arrondi arithmétique

La seconde manière d'arrondir est dite bancaire. La seule différence avec l'arrondi arithmétique concerne le chiffre 5. Lorsque le chiffre à arrondir est suivi du chiffre 5 sans être suivi d'autres chiffres, l'arrondi se fait au chiffre pair le plus proche. Ainsi, si ce chiffre 5 suit un chiffre impair, l'arrondi se fait au-dessus. Si, au contraire, le chiffre 5 suit un chiffre pair, le nombre est arrondi en-dessous. Cette méthode permet d'éviter une surévaluation de la valeur à obtenir due à un arrondi systématique au-dessus.

Imaginons deux nombres **1**X et **2**X avec X un chiffre de 0 à 9 à arrondir à la dizaine. Le tableau 4 montre comment ces nombres sont arrondis avec chacun des deux types d'arrondis ainsi que la différence engendrée par cet arrondi par rapport à la valeur de départ.

Nombre à arrondir à la dizaine	***Nombre arrondi à la dizaine avec l'arrondi arithmétique (.10¹)***	***Variation de la valeur due à l'arrondi***	***Nombre arrondi à la dizaine avec l'arrondi bancaire (.10¹)***	***Variation de la valeur due à l'arrondi***
10	1	0	1	0
11	1	- 1	1	- 1
12	1	- 2	1	- 2
13	1	- 3	1	- 3
14	1	- 4	1	- 4
15	**2**	**+ 5**	**2**	**+ 5**
16	2	+ 4	2	+ 4
17	2	+ 3	2	+ 3
18	2	+ 2	2	+ 2
19	2	+ 1	2	+ 1
20	2	0	2	0
21	2	- 1	2	- 1
22	2	- 2	2	- 2
23	2	- 3	2	- 3
24	2	- 4	2	- 4
25	**3**	**+ 5**	**2**	**- 5**
26	3	+ 4	3	+ 4
27	3	+ 3	3	+ 3
28	3	+ 2	3	+ 2
29	3	+ 1	3	+ 1

Tableau 4 : Erreurs générées par les arrondis arithmétique et bancaire (d'après Midden, 1997)

Lors d'un arrondi arithmétique, les écarts engendrés par l'arrondi systématique du chiffre précédé d'un 5 à l'unité supérieure ne sont pas compensés par les autres. Ce n'est pas le cas pour l'arrondi bancaire pour lequel les écarts engendrés par les arrondis sont toujours contrebalancés. Par exemple, lors d'une somme de nombres à arrondir à la

dizaine, les deux méthodes d'arrondis donneront des résultats différents, comme présenté dans le tableau 5.

Somme à effectuer	Arrondi arithmétique	Arrondi bancaire
15 + 25 = 40	$2.10^1 + 3.10^1 = 5.10^1$ Variation : **+ 10**	$2.10^1 + 2.10^1 = 4.10^1$ Variation : **0**
15 + 25 + 35 = 75	$2.10^1 + 3.10^1 + 4.10^1 = 9.10^1$ Variation : **+ 15**	$2.10^1 + 2.10^1 + 4.10^1 = 8.10^1$ Variation : **+ 5**
15 + 25 + 35 + 45 = 120	$2.10^1 + 3.10^1 + 4.10^1 + 5.10^1 = 14.10^1$ Variation : **+ 20**	$2.10^1 + 2.10^1 + 4.10^1 + 4.10^1 = 12.10^1$ Variation : **0**
15 + 25 + 35 + 45 + 55 = 175	$2.10^1 + 3.10^1 + 4.10^1 + 5.10^1 + 6.10^1 = 20.10^1$ Variation : **+ 25**	$2.10^1 + 2.10^1 + 4.10^1 + 4.10^1 + 6.10^1 = 18.10^1$ Variation : **+ 5**
15 + 25 + 35 + 45 + 55 + 65 = 240	$2.10^1 + 3.10^1 + 4.10^1 + 5.10^1 + 6.10^1 + 7.10^1 = 27.10^1$ Variation : **+ 30**	$2.10^1 + 2.10^1 + 4.10^1 + 4.10^1 + 6.10^1 + 6.10^1 = 24.10^1$ Variation : **0**

Tableau 5 : Erreurs engendrées par les arrondis arithmétique et bancaire lors de somme de valeurs

Il est à noter que l'arrondi arithmétique engendre des erreurs qui augmentent avec le nombre de valeurs impliquées dans le calcul. L'arrondi bancaire est donc statistiquement plus fiable.

Bien entendu, si le chiffre 5 est suivi d'autres chiffres, l'arrondi se fait à l'unité supérieure.

Etant donné que la méthode d'arrondi généralement présentée dans l'enseignement secondaire en Belgique est l'arrondi arithmétique, il ne serait pas étonnant de constater que les étudiants commettent une erreur d'arrondi lorsqu'il s'agit de reporter un nombre dont le chiffre à arrondir est suivi d'un 5 non suivi d'autres chiffres. Même si ce sujet n'est pas directement en lien avec la précision, il lui est connexe. Il en a donc été tenu compte dans le cadre de la recherche menée.

3. Les techniques de laboratoire

Comme mentionné lors de l'introduction, l'une des parties de cette recherche portant sur les apprentissages à réaliser en laboratoire traite de l'acquisition de compétences techniques. Pour cela, deux techniques de laboratoire importantes ont été étudiées : la dilution et le titrage colorimétrique.

3.1. La dilution

La technique de la dilution est un « *Processus consistant à ajouter à une solution une quantité appropriée de solvant de manière à obtenir une solution de concentration plus faible* » (Hill, Petrucci, Ralph, McCreary, & Perry, 2008, p. 7)
Il s'agit de prélever un certain volume de solution concentrée et d'y ajouter un certain volume de solution de manière à obtenir une solution de concentration moindre (Figure 23)

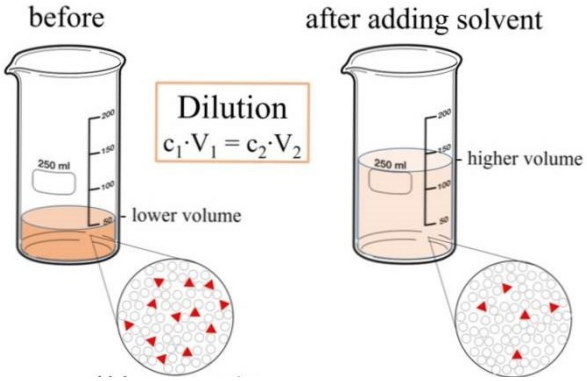


Figure 23 : Principe général de la dilution [5]

En laboratoire, il est nécessaire de connaître avec précision la concentration de la solution diluée. Pour cela, un volume connu avec précision de solution mère (= solution à diluer) est prélevé à l'aide d'une pipette jaugée. De cette manière, la quantité de matière de solution à diluer est connue. Elle peut en effet être calculée en multipliant la concentration de la solution mère (C) par le volume de solution prélevé (L) :

$$n\ (mol) = C\ \left(\frac{mol}{L}\right) .V\ (L)$$

Ce volume de solution est placé dans une pièce de verrerie, appelée un ballon jaugé, de volume connu. Ce dernier est rempli avec le solvant. La solution ainsi obtenue présente la même quantité de matière que dans le volume de solution mère prélevé mais dans un volume de solution plus important. La solution a été diluée. On peut écrire :

$$n_i = n_f \qquad \Rightarrow \qquad C_i\ .V_i = C_f\ .V_f$$

Le tableau 6 reprend une description, faite sur base de divers documents (livres de référence, syllabi, …) de la technique de la dilution et dans lequel nous distinguons les gestes à effectuer, les raisons de ces gestes et les moyens mis en œuvre pour les exécuter.

Gestes à effectuer	***Raisons***	***Moyens***
Transvaser 1,5 à 2 fois le volume à prélever de solution mère (solution à prélever) dans un bécher propre et sec	Ne pas prélever la solution directement dans la bouteille pour ne pas y transférer d'impuretés	1. Nettoyer le bécher 2. Sécher le bécher 3. Verser le volume voulu de solution mère
Rincer la pipette jaugée à l'eau déminéralisée	Eliminer les éventuelles impuretés	1. Verser un peu d'eau déminéralisée par le dessus de la pipette 2. Laisser couler l'eau à l'évier
Conditionner la pipette	Eliminer l'eau provenant du précédent rinçage pour éviter une dilution fortuite de la solution	1. Placer un système de pompage sur la pipette 2. Placer la pointe de la pipette dans la solution en tenant le bécher légèrement penché et la pipette verticale 3. Prélever quelques millilitres de la solution dans la pipette 4. Sortir la pipette de la solution et l'incliner à l'horizontale 5. Enlever le système de pompage 6. Faire tourner la pipette sur elle-même 7. Jeter le liquide prélevé dans un bécher poubelle ou une tourie de récupération

Prélever le volume voulu de solution mère	Le volume voulu est le volume de solution contenant la même quantité de matière que la solution diluée	1. Placer un système de pompage sur la pipette 2. Placer la pointe de la pipette dans la solution en tenant le bécher légèrement incliné et la pipette verticale 3. Prélever de la solution jusqu'à 1 à 3 cm au-dessus du trait de jauge 4. Sortir la pipette de la solution en maintenant la pointe de la pipette contre la paroi interne du bécher 5. Ajuster le niveau de liquide au trait de jauge
Rincer le ballon jaugé à l'eau déminéralisée	Eliminer les éventuelles impuretés	
Laisser couler le liquide dans le ballon jaugé	Le volume de solution prélevé contient la même quantité de matière que la solution diluée	1. Placer la pointe de la pipette contre la paroi interne du ballon jaugé à 45° 2. Laisser couler le liquide
Remplir le ballon jaugé	Le ballon jaugé est un instrument de précision. Le trait de jauge	1. Ajouter le solvant en rinçant les parois du ballon 2. Ajouter les dernières gouttes avec précision pour ajuster au trait de jauge
Homogénéiser la solution	Eviter un gradient de concentration dans le ballon jaugé	1. Fermer le ballon avec un bouchon adapté ou un morceau de parafilm 2. Retourner le ballon 3 ou 4 fois

Tableau 6 : Description de la technique de la dilution

La figure 24 représente les grandes étapes de la technique de la dilution.

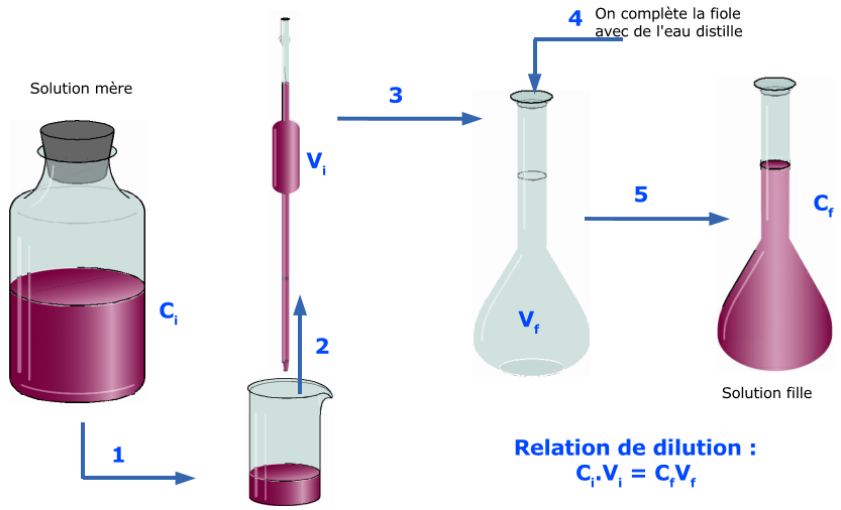


Figure 24 : Schématisation d'une dilution [6]

3.2. Le titrage colorimétrique

La technique du titrage est une technique employée pour doser une solution de concentration inconnue. Il s'agit d'ajouter un certain volume d'un réactif dit « titrant » de concentration connue à un volume connu d'un réactif « à titrer » dont la concentration est à déterminer. Connaissant le volume ajouté et la concentration du titrant, il est possible d'en calculer la quantité de matière. Cette dernière est proportionnelle à la quantité de matière de titré, compte tenu de la stœchiométrie de la réaction.

Pour une équation de réaction :

$$a\,A + b\,B \longrightarrow c\,C + d\,D$$

Où a, b, c et d représentent les coefficients stœchiométriques et A, B, C et D, les réactifs et produits.

A l'équivalence du titrage, c'est-à-dire lorsque les quantités de matière de réactif titrant et de réactif à titrer sont égales aux coefficients stœchiométriques près :

$$\frac{n_A}{a} = \frac{n_B}{b}$$

Dans la même lignée que le tableau précédent, le tableau 7 présente une description de la technique du titrage colorimétrique.

Gestes à effectuer	***Raisons***	***Moyens***
Rincer la burette à l'eau déminéralisée	Eliminer les éventuelles impuretés	1. Verser un peu d'eau déminéralisée par le dessus de la burette 2. Laisser couler l'eau à l'évier
Conditionner la burette	Eliminer l’eau provenant du précédent rinçage pour éviter une dilution fortuite de la solution	1. Verser quelques mL de solution titrante dans la burette fermée 2. Incliner la burette à l'horizontale 3. Faire tourner la burette sur elle-même 4. Laisser couler le liquide dans un berlin poubelle ou une tourie de récupération
Remplir la burette de solution titrante	La burette est un instrument permettant de connaître avec précision le volume de solution titrante versée lors d’un dosage	1. Attacher la burette à un statif 2. Mettre un entonnoir sur la burette, si besoin 3. Remplir la burette aux 3/4 de réactif titrant 4. Laisser couler la solution pour remplir la partie effilée 5. Remplir la burette jusqu'au-dessus de la graduation zéro 6. Retirer l'entonnoir 7. Ajuster le niveau de solution à la graduation zéro
Rincer l'erlenmeyer à l'eau déminéralisée	Eliminer les éventuelles impuretés	
Transvaser 1,5 à 2 fois le volume à prélever de solution à titrer dans un bécher propre et sec	Ne pas prélever la solution directement dans la bouteille pour ne pas y transférer d’impuretés	1. Nettoyer le bécher 2. Sécher le bécher 3. Verser le volume voulu de solution à titrer

Rincer la pipette jaugée à l’eau déminéralisée	Eliminer les éventuelles impuretés	1. Verser un peu d’eau déminéralisée par le dessus de la pipette 2. Laisser couler l’eau à l’évier
Conditionner la pipette	Eliminer l’eau provenant du précédent rinçage pour éviter une dilution fortuite de la solution	1. Placer un système de pompage sur la pipette 2. Placer la pointe de la pipette dans la solution en tenant le bécher légèrement penché et la pipette verticale 3. Prélever quelques millilitres de la solution dans la pipette 4. Sortir la pipette de la solution et l’incliner à l’horizontale 5. Enlever le système de pompage 6. Faire tourner la pipette sur elle-même 7. Jeter le liquide prélevé dans un bécher poubelle ou une tourie de récupération
Prélever le volume voulu de solution à titrer	Le volume voulu est le volume de solution contenant la quantité de matière à déterminer	1. Placer un système de pompage sur la pipette 2. Placer la pointe de la pipette dans la solution en tenant le bécher légèrement incliné et la pipette verticale 3. Prélever de la solution jusqu'à 1 à 3 cm au-dessus du trait de jauge 4. Sortir la pipette de la solution en maintenant la pointe de la pipette contre la paroi interne du bécher 5. Ajuster le niveau de liquide au trait de jauge

Laisser couler le liquide dans l’erlenmeyer	Un erlenmeyer est généralement utilisé pour faire un dosage car, en cas de projection, la solution ne fait qu’éclabousser les parois sans ressortir	1. Placer la pointe de la pipette contre la paroi interne du ballon jaugé penché à 45° 2. Laisser couler le liquide
Rincer les parois de l’erlenmeyer à l’eau déminéralisée	Eviter qu’il ne reste de la solution sur les parois car cette dernière ne serait alors pas dosée	
Ajouter un indicateur, si besoin	Détecter l’équivalence	
Placer l'erlenmeyer sous la burette	La solution titrante contenue dans la burette doit entrer en contact avec la solution à titrer contenue dans l’erlenmeyer	
Placer une feuille de papier blanc sous l'erlenmeyer, si besoin	Détecter plus facilement un changement de couleur de la solution	
Titrer rapidement la solution	Connaître approximativement le volume de solution titrante à ajouter pour atteindre l’équivalence	1. Ajouter le titrant mL/mL 2. Arrêter l'ajout de titrant lorsque la solution change de couleur 3. Vider l'erlenmeyer et recommencer la préparation d'un second titrage

Titrer lentement la solution (3 fois)	Connaître précisément le volume de solution titrante à ajouter pour atteindre l’équivalence	1. Ajouter 80 à 90 % du volume précédemment déterminé 2. Ajouter le titrant au goutte à goutte 3. Arrêter l'ajout de titrant lorsque la solution change de couleur

Tableau 7 : Description de la technique du titrage colorimétrique

La figure 25 représente les grandes étapes de la technique du titrage colorimétrique.

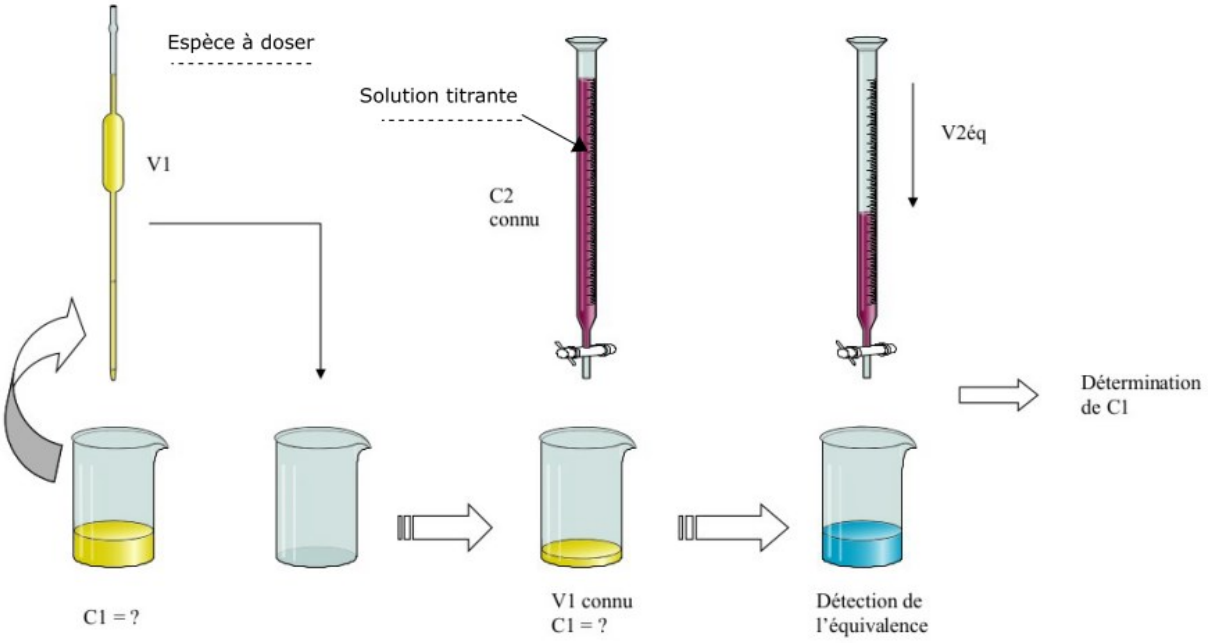


Figure 25 : Schématisation d’un titrage direct [7]

Chapitre 3
Questions de recherche

A l'Université de Namur, les activités expérimentales de chimie sont généralement de style vérification. Les étudiants doivent préparer la séance de travaux pratiques au préalable en lisant les rappels théoriques et le protocole fourni dans le syllabus et en visionnant les éventuelles vidéos mises à disposition. La séance en tant que telle débute par une interrogation d'entrée suivie d'une introduction générale réalisée par l'encadrant durant laquelle sont rappelés les grandes étapes de la manipulation à réaliser, quelques détails organisationnels et, le cas échéant, des précisions sur les attendus lors de la rédaction du rapport. Les étudiants passent ensuite à la manipulation proprement dite et terminent la séance par le remplissage d'un rapport pré-formaté. Le déroulement général d'une activité expérimentale est présenté à la figure 26.

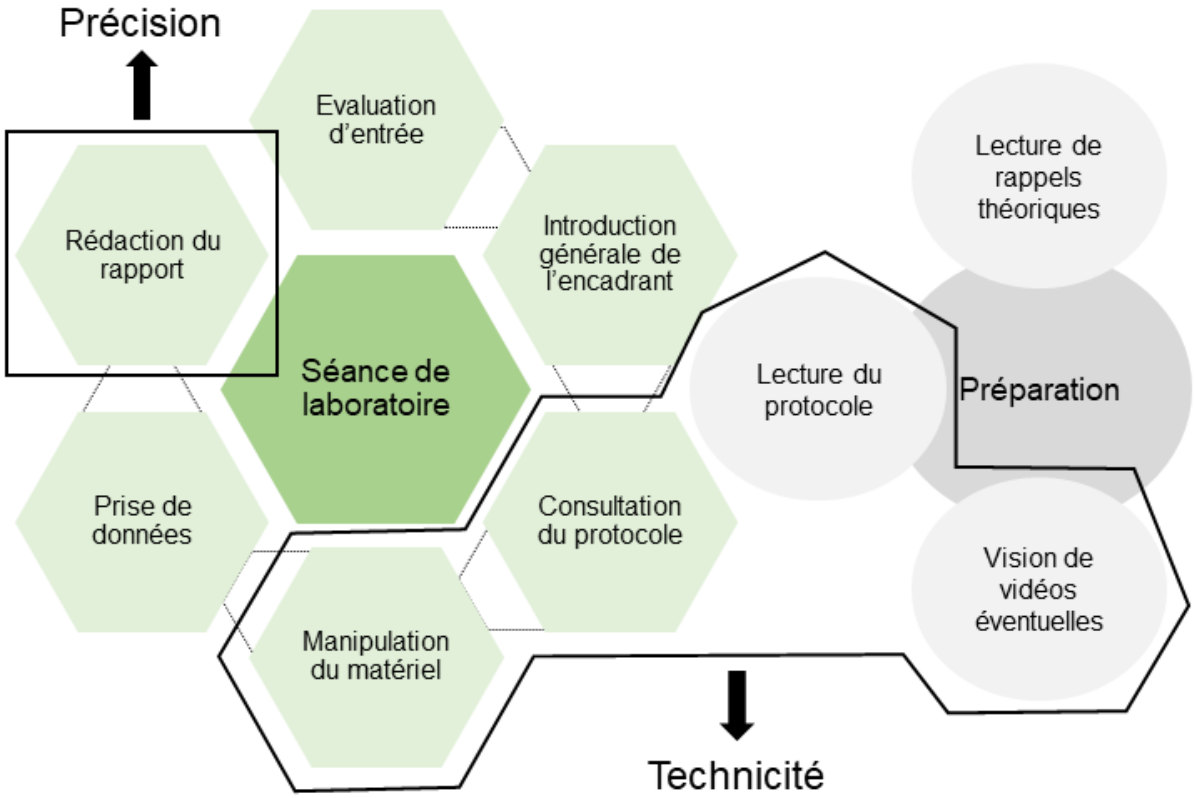


Figure 26 : Tâches des étudiants lors d'une activité expérimentale

A moins que la préparation ne donne lieu à une production, nous n'avons accès à aucune trace de cette partie de l'activité si ce n'est de manière indirecte durant la séance de laboratoire elle-même.

Dans ce schéma, les deux parties encadrées sont liées à des apprentissages typiques à ces séances de travaux pratiques : l'acquisition de gestes techniques et le report de résultats avec une précision adéquate. En effet, il paraît absurde de penser que ces derniers puissent être acquis lors d'un cursus qui ne serait composé que de cours purement théoriques et de séances d'exercices. Malgré cette particularité, ces deux

objectifs semblent ne pas être totalement atteints en fin de première année d'études dans un domaine scientifique dans notre institution. Combien de fois n'entendons-nous pas certains collègues encadrant des étudiants souligner que ces derniers ne savent pas préparer une solution, effectuer une pesée, réaliser un dosage, … ou qu'ils font encore « des erreurs de chiffres significatifs », expression consacrée pour exprimer que les étudiants ne respectent pas les règles permettant d'écrire leurs résultats avec une précision adéquate qui leur ont été enseignées.

Nous considérons, à tort ou à raison, certains savoirs et savoir-faire comme acquis en fin de première année. Il semblerait pourtant que ce ne soit pas toujours le cas. Si certains étudiants n'ont pas intégré ces savoirs et savoir-faire de manière satisfaisante au travers des activités expérimentales proposées, il est peut-être nécessaire de remettre l'enseignement prodigué en question. A quelles ressources ont accès les étudiants lors des apprentissages susmentionnés ? Pouvons-nous les considérer comme suffisantes ? Quelles éventuels nouveaux dispositifs pouvons-nous mettre en place pour remédier aux problèmes rencontrés ?

1. La retranscription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate

Les règles mentionnées précédemment sont vues en début d'année académique lors d'une présentation, réalisée en auditoire, de l'organisation des séances de travaux pratiques et d'exercices. Elles sont ensuite éventuellement rappelées par l'encadrant lors de l'introduction du premier TP. Il n'y a pas de séance d'exercices associée pour permettre un entraînement au préalable. Les étudiants ont cependant l'occasion de s'entraîner au travers des exercices proposés au début du syllabus de TP. Cette matière est donc présentée hors contexte de laboratoire, plutôt de manière théorique. Or, cela peut constituer une difficulté pour les étudiants qui peuvent ne pas voir l'utilité de la démarche dans un environnement différent, celui du laboratoire, et, dès lors, ne pas appliquer les règles alors même que la situation l'exige.

Notre volonté est donc de construire un outil présentant cette matière de manière moins succincte et plus contextualisée. Bien entendu, des questions se posent sur le type de dispositif à mettre en place, les éléments théoriques et/ou pratiques à aborder, la manière de les aborder, etc.

Les premières questions à formuler concernent les sujets à exposer. Tout d'abord, il est légitime de se questionner sur le bien-fondé de l'enseignement prodigué. Pourquoi enseigner ces règles issues de transpositions didactiques ? Pourquoi ne pas revenir à

une méthode plus experte ? L'idée serait alors de bouleverser des habitudes et des pratiques bien ancrées dans notre institution non seulement dans l'enseignement de la chimie mais aussi de la physique, de la biologie, … des sciences expérimentales de manière générale. Et pourquoi pas ? Pourquoi ne pas se rassembler tous autour de la table pour en discuter ? Ce simple exemple illustre cependant que nous sommes confrontés à des contraintes didactiques et institutionnelles pouvant être à l'origine de choix au niveau de la matière à enseigner.

Ces contraintes ne sont pas les seuls éléments dont il faut tenir compte lors de la sélection des notions et concepts à enseigner. Il faut aussi prendre en considération les difficultés auxquelles font face les étudiants. De par la littérature, nous en connaissons certaines auxquelles les étudiants peuvent être confrontés telles que la non prise en compte des incertitudes de mesures sur certains appareils, le manque de sens des règles, l'ambiguïté des termes « décimale » et « précision » ou encore le manque de signification de la notion de chiffre significatif ou du chiffre « zéro ». Nos étudiants sont-ils effectivement confrontés à ces difficultés ? Y en a-t-il d'autres ?

Pour répondre, il faut nécessairement recenser les erreurs commises par les étudiants sur la précision lors du report des données et résultats expérimentaux. Il est aussi utile de se demander s'ils intervertissent les règles, s'ils appliquent l'inverse de ce que la règle préconise, … ce qui revient à se questionner sur la (ou les) raison(s) pour laquelle (lesquelles) ils ont reporté telle valeur avec telle précision. Quelle(s) logique(s), quelle(s) méthode(s) sous-tendent les erreurs commises par les étudiants lors du report de leurs résultats avec une précision adéquate ? Le mieux est encore de leur demander…

Sur base de leurs réponses, il est possible d'aller plus loin dans la réflexion. Pourquoi pensent-ils comme ça ? Quel(s) raisonnement(s), quelle(s) préconception(s) permettent d'expliquer ces logiques et méthodes employées ? Quelles sont les causes de ces erreurs ? Là aussi, la littérature donne l'un ou l'autre élément de réponse. Un premier a déjà été cité : le manque de sens des règles employées. Il est possible que ce soit la raison pour laquelle les étudiants intervertissent les règles, voire même n'en utilisent qu'une quelle que soit l'opération envisagée. Un second élément pourrait être la croyance qu'ont certains étudiants qu'il existe une « vraie » valeur connue seulement de l'encadrant. Cette croyance pourrait peut-être les amener à garder un maximum de chiffres considérant, à tort, être plus « précis ». Faisant ce raisonnement, ils confondraient la précision, en lien avec l'incertitude de mesure, et l'exactitude, en lien avec l'erreur de mesure. Les apports de la littérature ne permettent cependant pas d'expliquer toutes les erreurs commises. Par exemple, comment justifier l'erreur consistant à considérer un chiffre zéro terminant un nombre comme non significatif alors qu'il est indicatif de la

précision de la mesure ? Ni le manque de sens, ni cette croyance en l'existence d'une « vraie » valeur ne permettent de nous éclairer sur le sujet. Bien entendu, au premier abord, nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses sur ces causes d'erreur. La seule manière de les corroborer ou de les infirmer est de les prendre en considération lors de la création de l'outil et de tester ce dernier.

Les réponses à ces diverses questions permettent de poser les jalons du point de vue du contenu à présenter c'est-à-dire le didactique. Il reste le point de vue pédagogique. Généralement, le choix d'un dispositif d'enseignement ne dépend pas que des connaissances et compétences que nous souhaitons faire acquérir aux étudiants mais également de contraintes tant pédagogiques qu'institutionnelles. En effet, un outil qui ne tiendrait pas compte, par exemple, de la durée moyenne durant laquelle un étudiant est capable de rester concentré serait plus que probablement d'une efficacité limitée.

Enfin, une fois l'outil créé sur base de tous ces éléments didactiques et pédagogiques, un test doit être réalisé. Quelle valeur peut avoir un dispositif qui ne serait pas testé ? La question ne porte pas sur le choix du type d'outil car il dépend essentiellement de contraintes fixes et déterminées. Par contre, ce dispositif étant construit sur base des difficultés étudiantes, il serait intéressant de regarder à son impact sur la manière dont les étudiants reportent les résultats expérimentaux. Atteint-il ses objectifs ? Répondre à cette question revient à se demander si les hypothèses posées pour expliquer les méthodes employées par les étudiants sont valides.

Ainsi, nos questions de recherche portent sur les sujets suivants :

- la légitimité du savoir enseigné ;
- les difficultés auxquelles sont confrontés les étudiants ;
- les méthodes employées par les étudiants lors du report des résultats expérimentaux ;
- les raisonnements sous-tendant les méthodes susmentionnées.

Ces questions montrent que cette étude est une recherche-action. Elle aboutit à la production d'un dispositif d'enseignement. Dans ce cadre, la méthodologie qui nous paraît la plus adaptée est l'ingénierie didactique de Michèle Artigue (1988).

2. Les acquis techniques des étudiants lors d'une activité expérimentale

Tout comme pour le sujet précédent, la question des ressources employées par les étudiants peut se poser. Comme mentionné précédemment, les étudiants ont accès à un protocole décrivant la manipulation à réaliser. L'apprentissage des différents gestes techniques à effectuer passe alors par la lecture attentive d'un écrit, à la manière d'une recette de cuisine. Séré (2002) rapporte cependant que, lorsque la procédure est totalement décrite, les étudiants ont tendance à donner plus d'importance à l'obtention des données qu'à la compréhension et l'acquisition des gestes techniques. Une manière de leur faire prendre conscience de l'importance de la technicité serait alors de les amener à produire leur propre protocole de laboratoire.

Dans le cadre de cette recherche, nous faisons l'hypothèse que, si ce travail leur est demandé, les étudiants n'écriront que ce qui leur est nécessaire. Ils ne décriront que les éléments qui leur semblent indispensables.

En début d'apprentissage, la plupart des étudiants s'inscrivant en première année d'études en chimie n'ont eu que fort peu voire même pas du tout d'activités expérimentales durant leurs années d'enseignement secondaire. Nous nous attendons donc à ce que les protocoles rédigés soient particulièrement détaillés, tout au moins la première fois. Mais est-ce le cas ? Quel est le degré de détail des protocoles rédigés par les étudiants ?

Et savent-ils seulement ce qu'est un protocole… Selon Marzin et al. (2007, p.242), un protocole se définit comme « *une liste de tâches expérimentales organisées de façon temporelle et/ou logique, dont l'objectif est de déterminer des valeurs spécifiques en relation avec les hypothèses scientifiques qui sous-tendent l'expérience* ». Il s'agit d'une « liste de tâches expérimentales ». Aucun élément de nature théorique ne devrait logiquement être repris. Cependant, notre hypothèse impose de laisser à l'étudiant la liberté d'inclure toutes les composantes, tous les paramètres qui lui semblent utiles. Il se pourrait qu'il ne respecte pas la définition donnée à la lettre. Nous pouvons donc raisonnablement nous demander de quoi sont composés les protocoles rédigés par les étudiants. Ne sont-ils constitués que de listes de tâches expérimentales ? De quelle nature sont les éléments présents ? Comment sont-ils structurés, agencés ? En réalité, la liberté laissée aux étudiants se situe non seulement au niveau du contenu mais aussi de la forme. Il est possible que les protocoles ne soient même pas présentés comme des

listes, éventuellement hiérarchiques, mais sous forme de texte continu, de schémas, de dessins, …

Toujours sur base de l'hypothèse selon laquelle les étudiants n'écrivent que ce dont ils estiment avoir besoin, nous pouvons avoir une idée des connaissances techniques acquises en cours d'année en faisant une analyse des gestes qu'ils ne mentionnent plus la deuxième fois qu'il leur est demandé de rédiger un protocole. Quels types de gestes ne sont plus mentionnés par les étudiants ? Pourquoi ?

Et la technicité dans tout cela ? Il faut se demander l'impact de la rédaction des protocoles sur l'exécution de la technique de laboratoire décrite. Y a-t-il une corrélation entre ce qu'écrivent les étudiants dans leurs protocoles et les tâches effectivement réalisées en laboratoire ?

Les tâches effectuées en laboratoire sont-elles conformes aux attendus institutionnels ? En début d'apprentissage, la réponse a fort peu de chance d'être positive. Même si c'était le cas, peut-on vraiment dire qu'il y a « apprentissage » … Il est évident que, pour être totalement acquis, les gestes techniques doivent être répétés. Pourtant, il est impensable que les acquis lors de cette séance de laboratoire pour laquelle les étudiants ont rédigé un protocole ne soient pas différents de ceux d'une séance dont le protocole est fourni. Quelles différences peut-il y avoir entre les gestes réalisés par les étudiants dans les deux cas ? Quel est le poids du protocole expérimental en tant que ressource dans le cadre d'un apprentissage technique ? Il est plus que probable qu'il soit d'une importance non négligeable si on se réfère à l'article de Séré & Beney (1997). Ces deux auteurs rapportent que les étudiants ont tendance à consulter leur syllabus de TP à tout moment de la manipulation, y compris au milieu d'une action. Cette dernière est alors décomposée en étapes élémentaires, ce que Vermersch (1985) a appelé l'atomisation de l'action. Cet article ne mentionne que les découpages des actions par des périodes de lecture qui sont considérées comme des prises d'informations. Ces découpages ne peuvent-ils pas être autre chose que cela ? N'y a-t-il, lors des activités expérimentales, que des actions visant à mener la tâche à bien et des prises d'informations ? Il est vraisemblable que ce ne soit pas le cas, ne serait-ce que parce que les étudiants sont en interaction durant l'activité. Il est rare que des personnes en interaction dans le cadre d'une tâche n'en viennent pas à déborder de cette dernière. C'est d'ailleurs une idée qui ressort de certains courants issus de la théorie de l'activité : l'activité ne se résume pas à la tâche prescrite. De quoi est alors composée l'activité réelle des étudiants ?

De plus, les moments de prise d'informations peuvent être autres que de simples lectures du protocole, de nouveau du fait des interactions existant entre étudiants mais également avec l'encadrant. Le protocole expérimental n'est donc certainement pas la seule

ressource à laquelle peuvent se raccrocher les étudiants. Quelles sont les autres ressources auxquelles font appel les étudiants ? A quoi servent-elles ? Conformément au principe d'autopoïèse, les étudiants interagissent avec leur environnement et le transforment. Ils vont s'adapter à certaines conditions, souvent imprévisibles. Par exemple, comment va réagir un étudiant qui se rend compte qu'il lui manque du matériel, qui s'aperçoit que ses collègues censés effectuer la même tâche ne font pas la même chose ou qui réalise qu'il a commis une erreur de manipulation ? Ces événements ne font pas partie de la tâche à effectuer. Ils sont particuliers à la situation. Pour chacun de ces événements particuliers, l'étudiant fait appel à une ou plusieurs ressources. Ces dernières ne sont pas toutes utilisées pour les mêmes raisons. Un étudiant occupé de « jouer » avec un appareil et expliquant qu'il consulte son voisin pour en connaître le fonctionnement utilise un de ses camarades comme ressource et donne une information sur le geste qu'il fait : il tente de comprendre comment manipuler l'appareil en question. Un étudiant regardant autour de lui et exprimant qu'il n'est pas en retard car les autres font la même chose que lui donne aussi ces deux types d'informations. La ressource est formée par les autres étudiants. La fonction de son acte est de se situer dans le temps. S'intéresser aux raisons pour lesquelles telle ou telle ressource est employée peut donc donner accès aux fonctions des gestes que les étudiants effectuent. Quelles sont ces fonctions ? Quel sens les étudiants donnent-ils à leurs actes ?

Sur cette partie de la recherche ayant pour thème les acquis techniques, les questions posées portent sur :

- le degré de détail des protocoles rédigés par les étudiants ;
- la nature pratique ou théorique des éléments présents dans ces protocoles ;
- l'évolution de ce degré de détail et de la nature des éléments présents en cours d'année académique ;
- la corrélation entre le contenu de ces protocoles rédigés et les gestes techniques réalisés lors des séances de laboratoire ;
- la conformité de la tâche effectuée par les étudiants ;
- l'impact du protocole sur les gestes techniques réalisés en laboratoire ;
- les actes des étudiants autres que la tâche attendue ;
- les ressources utilisées par les étudiants lors des activités expérimentales ;
- la fonction des différents actes réalisés lors de ces activités de laboratoire.

Chapitre 4
Méthodologie

1. La retranscription de résultats expérimentaux avec la précision adéquate

Lors de cette étude, nous utilisons l'ingénierie didactique d'Artigue (1988). Il s'agit d'une méthodologie de recherche impliquant la réalisation et la mise en place d'un outil ou d'une séquence de cours sur base d'observations, de difficultés rencontrées par les enseignants et/ou les apprenants, d'objectifs à atteindre, … La validation de cet outil ou de cette séquence se fait par la comparaison des résultats de tests a priori (sans l'outil ou la séquence) et a posteriori (avec l'outil ou la séquence). Elle est découpée en quatre phases :

- les analyses préalables ;
- la conception et l'analyse a priori ;
- l'expérimentation ;
- l'analyse a posteriori et la validation.

Si l'outil ou la séquence de cours, suite à l'analyse à posteriori, ne donne pas entière satisfaction, la méthodologie employée peut être reprise comme schématisé sur la figure 27 :

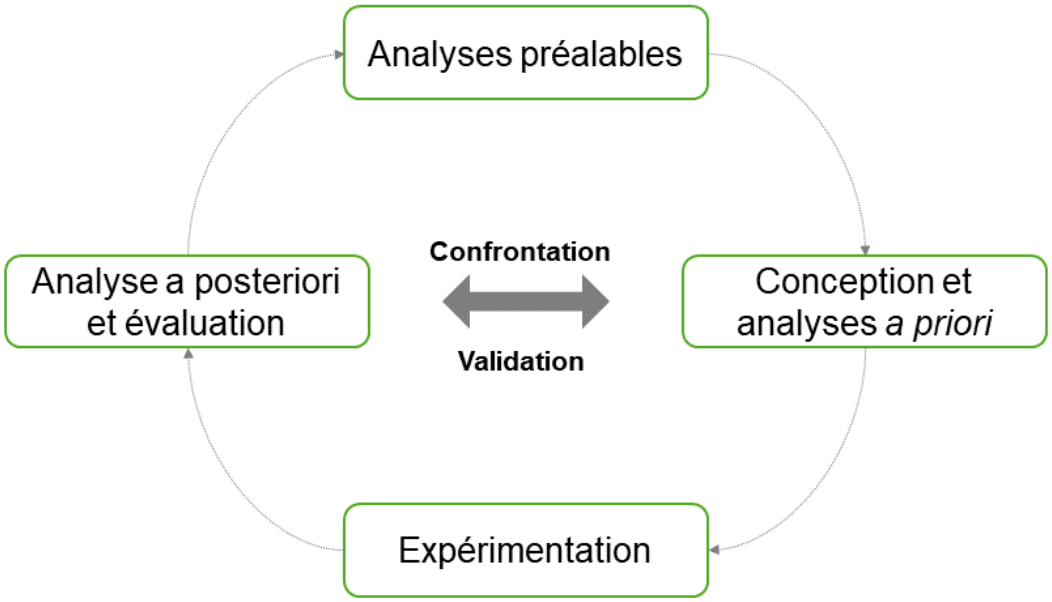


Figure 27 : Méthodologie générale de l'ingénierie didactique (d'après Artigue, 1988)

1.1. Les analyses préalables

Comme son nom l'indique, les analyses préalables sont des études préliminaires ayant pour but de faire un état des lieux des objectifs à atteindre et des contraintes auxquelles les enseignants et apprenants sont confrontés.

1.1.1. La légitimité du savoir

Une partie de ces analyses a trait aux contraintes auxquelles l'outil doit répondre. Elles peuvent être de différentes natures : institutionnelles, organisationnelles, pédagogiques, didactiques, … La connaissance de ces contraintes entraîne des choix tant au niveau du contenu à enseigner que de la manière de l'enseigner. Ces contraintes sont effectivement à l'origine du type de dispositif mis en œuvre.
Une autre partie de ces analyses concerne plus particulièrement le savoir à enseigner. Pour connaître les difficultés d'apprentissage, il est nécessaire de connaître la provenance de ce savoir ainsi que les transformations qu'il a subies au cours du temps ou à des fins d'enseignement. Dans le premier cas, l'analyse est dite épistémologique et se fait généralement en consultant des livres de référence et/ou des ouvrages ou articles d'époque. L'écriture de résultats expérimentaux avec la précision adéquate n'étant pas un savoir mais plutôt un savoir-faire, l'analyse épistémologique aurait dû se porter sur les savoirs qu'il met en œuvre, c'est-à-dire sur une grande partie des concepts de statistique et de probabilité. Cette analyse n'est donc pas présentée par la suite. Dans le second cas, l'analyse est celle des transpositions didactiques ayant mené au savoir tel qu'il est enseigné. En effet, comme écrit dans le deuxième chapitre, comprendre les transformations du savoir savant au savoir enseigné peut nous éclairer sur certaines difficultés des étudiants.
Ces premiers éléments vont permettre de répondre à la première question de recherche, celle de la légitimité du savoir. Choisissons-nous d'enseigner des règles issues d'une transposition didactique ou une méthode plus experte ?

1.1.2. Détermination des difficultés étudiantes

Dans les analyses préalables concernant le savoir, il y a également l'étude de l'enseignement tel qu'il est donné et de ses effets. Ces données sont obtenues en consultant des manuels de cours, des séquences de cours et en faisant des observations en situation d'apprentissage ou des tests auprès des apprenants. L'objectif est, dans notre cas, de déterminer les difficultés étudiantes lors du report de leurs résultats expérimentaux avec une précision adéquate.

1.1.2.1. *Séquence de cours*

Les étudiants peuvent assister à une présentation des règles en début d'année académique à l'occasion d'une introduction aux séances de laboratoire et d'exercices. Elles sont présentées peu ou prou comme dans leur syllabus de TP. Le contenu et l'ordre des sujets est déterminé et commenté.

1.1.2.2. *Analyse de productions étudiantes*

La détermination des types d'erreurs commises s'est effectuée durant l'année scolaire 2016-2017 auprès des étudiants inscrits en première année d'études supérieures en sciences pharmaceutiques et en sciences biomédicales ayant un cursus de chimie identique.

En début d'année académique, les étudiants réalisent leur première séance de laboratoire qui consiste à déterminer la masse atomique de deux métaux, le magnésium et l'aluminium, en appliquant la loi des gaz parfaits. Lors de la rédaction du rapport de laboratoire, les étudiants doivent remplir un tableau de résultats reprenant les différentes valeurs et opérations à effectuer. Les erreurs commises lors de l'écriture des résultats du point de vue de la précision ont été repérées au travers de 166 productions d'étudiants.
Cinq calculs ont été choisis pour réaliser cette analyse parmi les opérations à effectuer pour rédiger le rapport. Les calculs reprenant les différentes opérations mathématiques sont présentés et détaillés dans le tableau 8 (page ci-après).
Lors de la séance de laboratoire, les étudiants réalisent des mesures avec une précision donnée et utilisent des constantes tabulées.

Opération	***Description***	***Calcul***
Addition	Transformation de la température en kelvin	$\mathrm{T(°C)} + 273{,}15 = \mathrm{T(K)}$
Soustraction	Calcul de la pression exercée par un gaz dans un ballon	$\mathrm{P_{atm}} - \mathrm{P_{eau}} - \mathrm{P_{sat}} = \mathrm{P_{H_2}}$ P_{atm} = pression atmosphérique (Torr) P_{eau} = pression de la colonne d'eau (Torr) P_{sat} = tension de vapeur saturante en eau (Torr) $\mathrm{P_{H_2}}$ = pression en dihydrogène (Torr)
Multiplication	Calcul de la masse de magnésium	$L_{ruban} \times \mu = m$ L_{ruban} = longueur du ruban (cm) μ = masse linéique ($mg.cm^{-1}$)
Division	Conversion de la pression exercée par une colonne d'eau en Torr	$\frac{h_{eau}}{d_{Hg}} = P_{eau}$ h_{eau} = hauteur d'une colonne d'eau (mm) d_{Hg} = densité du mercure P_{eau} = pression de la colonne d'eau (Torr)
Multiplication & division	Calcul de la quantité de matière de dihydrogène par la loi des gaz parfaits	$\frac{P \times V}{R \times T} = n$ P = pression exercée par le gaz (Torr) V = volume de gaz (L) R = constante des gaz parfaits ($Torr.L.K^{-1}.mol^{-1}$) T = température (K)

Tableau 8 : Description des différentes opérations utilisées pour effectuer les analyses sur les erreurs commises par les étudiants du point de vue de la précision des résultats

Le tableau 9 (page ci-après) reprend la précision et le nombre de chiffres significatifs pour les mesures, les données et le résultat des calculs attendus. En gras sont repris les éléments caractérisant la précision nécessaire pour transcrire le résultat avec la précision adéquate pour l'opération envisagée. Il arrive qu'il y ait l'une ou l'autre différence au niveau du nombre de chiffres significatifs, notamment dans le dernier calcul à effectuer car les étudiants reprennent des valeurs calculées précédemment. Par conséquent, s'ils se sont trompés lors de la retranscription d'un résultat, l'erreur commise s'est répercutée sur le calcul de la quantité de matière (multiplication & division).

Opérations	***Mesures ou données***			***Résultats***	
	Grandeurs	***Précision***	***Nombre de C.S.***	***Précision***	***Nombre de C.S.***
Addition	Température	**Dixième (°C)**	3	**Dixième (K)**	4
	Facteur de transformation de la température en kelvin	Centième (K)	5		
Soustraction	Pression atmosphérique	**Unité (Torr)**	3	**Unité (Torr)**	3
	Pression de la colonne d'eau	Dixième (Torr)	2		
	Tension de vapeur saturante en eau	Millième (Torr)	5		
Multiplication	Longueur du ruban	Dixième (cm)	**3**	Unité (mg)	**3**
	Masse linéique	Millième ($mg.cm^{-1}$)	5		
Division	Hauteur de la colonne d'eau	Unité (mm)	**2**	Dixième (Torr)	**2**
	Masse volumique du mercure	Dixième ($g.cm^{-3}$)	3		
Multiplication & division	Pression exercée par le gaz	Unité (Torr)	**3**	Dépend des valeurs obtenues lors des mesures	**3**
	Volume de gaz	Millième (L)	**3**		
	Température	Dixième (K)	4		
	Constante des gaz parfaits	Centième ($Torr.L.K^{-1}.mol^{-1}$)	4		

C.S. = Chiffres significatifs

Tableau 9 : Précision des mesures, des données et des résultats attendus et nombre de chiffres significatifs pour les valeurs de grandeurs dans les différentes opérations et pour le résultat du calcul

Le tableau de résultats que doivent remplir les étudiants stipule dans chacune des lignes ce que l'étudiant doit calculer. L'ordre des calculs est le suivant : calcul de la masse de magnésium (multiplication), de la température en kelvin (addition), de la pression exercée par la colonne d'eau (division), de la pression en dihydrogène (soustraction) et de la quantité de matière en dihydrogène (mélange de multiplication et de division). La masse de l'aluminium est donnée. Il n'est donc pas nécessaire de la calculer. Ainsi, toutes les opérations sont effectuées deux fois sauf la multiplication qui n'est exécutée que pour le magnésium.

1.1.2.3. *Test proposé aux étudiants*

Une enquête a été menée au terme des trois premières séances de TP afin d'identifier les erreurs rémanentes et vérifier les hypothèses posées précédemment. Un formulaire papier reprenant les mêmes opérations que lors du premier TP (Figure 28, page ci-après) a été remis à 85 étudiants au début d'une séance de TP. Les valeurs choisies pour réaliser les calculs sont similaires à celles que les étudiants ont obtenu lors de l'activité, tant au niveau de l'ordre de grandeur qu'au niveau de la précision. Elles ont cependant été réfléchies de manière à pouvoir identifier certaines difficultés déjà rapportées dans des études précédentes (Clase, 1993; Pacer, 2000; Satek, 1977; Treptow, 1980; Zipp, 1992) ou repérées dans les premiers rapports de laboratoire ainsi que d'éventuelles erreurs d'arrondis. Les formules à appliquer ont été données aux étudiants afin d'éviter de faire appel à un contenu matière dont ils auraient eu à se rappeler et éviter les éventuels problèmes dus à une possible surcharge cognitive.

Lors de la présentation de ce test aux étudiants, il a été stipulé qu'il n'aurait d'utilité que dans le cadre d'une recherche sur l'écriture des résultats avec la précision adéquate et qu'ils devaient donc faire attention lors du report de leurs résultats.

Comme mentionné précédemment, les valeurs à mettre dans les calculs ont été sélectionnées en fonction des erreurs repérées au travers des rapports analysés.

Lors du TP de chimie générale intitulé « Calculs stœchiométriques - Détermination approximative de la masse atomique du Mg et Al », vous avez réalisé la réaction suivante afin d'évaluer la masse molaire du magnésium :

$$Mg + 2\,HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2$$

Les données récoltées par un étudiant ont été reprises dans le tableau ci-dessous. Réalisez les calculs suivants en veillant à **détailler vos calculs** et en faisant **attention aux unités** ainsi qu'**aux chiffres significatifs** !

Longueur mesurée du ruban de magnésium : *13,7 cm*
Masse linéique : *18,750 mg.*cm^{-1}
Température du laboratoire : *17,8 °C*
Hauteur de la colonne d'eau mesurée : *68 mm*
Densité du mercure : *13,6*
Pression du laboratoire : *748 Torr*
Pression de vapeur d'eau : *15,284 Torr*
Volume de H_2: *246 mL*
Constante des gaz parfait : 62,364 *Torr.L.*$K^{-1}.mol^{-1}$

a) <u>Calculez la masse de magnésium prélevée :</u> *m = L .* $m_{linéique}$

b) <u>Convertissez la température du laboratoire en Kelvin :</u> *T(K) = T(°C) + 273,15*

c) <u>Calculez la pression totale de H_2 dans le ballon</u>

- Pression de la colonne d'eau : $P_{colonne} = \frac{h\,(mm)}{d_{Hg}}$
- Pression totale de H_2 dans le ballon : $P_{H_2} = P_{labo} - P_{colonne} - P_{H_2O}$

d) <u>Calculez la quantité de matière de H_2 obtenue :</u> $n = \frac{P_{H_2}.V_{H_2}}{R.T}$

e) <u>Calculez la masse molaire du magnésium :</u> $n_{Mg} = n_{H_2}$ $M_{Mg} = \frac{m_{Mg}}{n_{Mg}}$

Figure 28 : Test réalisé par les étudiants inscrits en première année d'études en sciences pharmaceutiques et en sciences biomédicales en mars 2017

Chaque opération est présentée ci-après en reprenant les valeurs sélectionnées, le résultat affiché par la calculatrice, le résultat à retranscrire avec la précision adéquate ainsi que la justification des choix effectués c'est-à-dire la validation interne.

Le premier calcul à effectuer est la multiplication. Le résultat doit donc présenter autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul qui en comporte le moins. Pour vérifier que les étudiants appliquent cette règle, il est nécessaire que les valeurs ne possèdent pas le même nombre de chiffres. Elles n'ont pas non plus le même nombre de décimales, ce qui permet de voir s'ils utilisent la règle à employer lors d'une addition ou soustraction :

$$m = 13{,}7\,.\,18{,}750 = 256{,}875 = 257\ mg$$

Dans ce calcul, la masse linéique est précise au millième. L'écriture de cette valeur par les étudiants avec une précision au centième serait indicatif du fait qu'ils ne considèrent pas le « zéro » comme significatif. De plus, le résultat devant être arrondi à l'unité supérieure, il est possible de voir les éventuelles erreurs d'arrondi.

L'opération suivante est une addition. Le résultat doit présenter autant de décimales que le terme le moins précis du calcul. C'est la raison pour laquelle les valeurs ne possèdent pas le même nombre de décimales. Ces valeurs n'ont pas non plus le même nombre de chiffres significatifs, ce qui permet de vérifier si les étudiants utilisent la règle à employer lors de multiplications et divisions :

$$T(K) = 17{,}8 + 273{,}15 = 290{,}95 = 291{,}0\ K$$

Les termes ont été sélectionnés de manière à amener les étudiants à arrondir à l'unité supérieure tout en étant précis au dixième. Ils doivent donc écrire un « zéro » en décimale.

La troisième opération est une division. Tout comme pour la multiplication et pour les mêmes raisons, les valeurs ne possèdent ni le même nombre de chiffres significatifs, ni le même nombre de décimales.

$$P_{colonne} = \frac{68}{13{,}6} = 5 = \ 5{,}0\ Torr$$

La valeur de la hauteur de colonne d'eau a été choisie de manière à ce que le résultat affiché par la calculatrice soit un nombre entier ne possédant pas suffisamment de chiffres pour respecter la règle à appliquer. Cela oblige les étudiants à rajouter un « zéro ».

La quatrième opération est une soustraction. Les termes du calcul présentent un nombre de chiffres significatifs et de décimales différents pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'addition.

$$P_{H_2} = 748 - 5{,}0 - 15{,}284 = 727{,}716 = 728\ Torr$$

L'une des valeurs est précise à l'unité. Elle ne possède pas de décimales. Un résultat reporté par les étudiants avec une décimale indiquerait une compréhension limitée de la règle. Elle serait comprise uniquement en termes de décimales et non de précision.
La cinquième opération implique des multiplications et une division :

$$n = \frac{728\,.\,0{,}246}{62{,}364\,.\,291{,}0} = 9{,}86608\ldots\ 10^{-3} = 9{,}87\,.\,10^{-3}\ mol$$

Deux des valeurs à reporter dans le calcul proviennent des précédentes opérations. Les deux autres valeurs sont le volume de gaz et la constante des gaz parfaits. Cette dernière est normalement connue des étudiants avec une précision au centième. Nous avons choisi de donner une valeur plus précise pour éviter que la constante ne présente le même nombre de chiffres significatifs que la température. Le volume de gaz est donné en millilitre pour voir si les étudiants vont penser à la cohérence des unités. De plus, sa conversion en litre peut se faire en transformant la valeur soit en notation scientifique, soit en nombre décimal. Dans ce dernier cas apparaît un « zéro » à gauche du premier chiffre non nul que les étudiants pourraient considérer comme significatif.

1.1.3. Détermination des méthodes employées par les étudiants

Toujours dans les analyses préalables, une autre partie a pour sujets les apprenants eux-mêmes. Il s'agit de déterminer leurs conceptions, leurs difficultés liées au savoir et les obstacles auxquels ils peuvent être confrontés au cours de l'apprentissage. Cette étude est menée au travers de tests habituellement réalisés avant la séquence d'enseignement en ce qui concerne les conceptions, en cours de séquence pour ce qui est des obstacles et après lorsqu'il s'agit de mettre au jour des difficultés.

La question de recherche traitée au travers de cette partie d'analyse porte sur les logiques des étudiants, les méthodes qu'ils emploient lors de la retranscription des résultats expérimentaux.
Pour déterminer ces méthodes, une étude de cas a été effectuée sous forme d'entretiens d'explicitation sur base volontaire. Les neuf étudiants ayant accepté d'être interrogés ont commenté la façon dont ils ont reporté chacune des valeurs, que ces dernières aient été transcrites avec la précision adéquate ou pas. Dans la suite de ce travail, les propos tenus par les étudiants sont retranscrits verbatim, E désignant l'étudiant et C le chercheur. Les entretiens ont été menés par une étudiante réalisant un mémoire dans notre unité de recherche.

Un résumé des différentes phases de ces analyses préalables est repris dans le tableau 10.

Sujet de la question de recherche	Type d'analyse	Type et nombre de productions	Type de résultats
Légitimité du savoir	Détermination de contraintes didactiques, pédagogiques, institutionnelles, …	/	Contraintes
	Transformations dues aux transpositions didactiques	/	Transformations du savoir Conséquences de ces transformations
Difficultés étudiantes	Etude de l'enseignement	Séquence de cours (syllabus)	Contenu de l'enseignement Ordre des sujets présentés
	Etude des effets de l'enseignement	166 rapports de laboratoire	Erreurs commises
		85 tests	Erreurs commises
Logiques, méthodes des étudiants		9 entretiens d'explicitation	Commentaires d'étudiants

Tableau 10 : Résumé des analyses préalables

1.2. La conception et l'analyse a priori

Dans le cadre de la conception, le chercheur va faire des choix en tenant compte des contraintes auxquelles il est soumis. Il va agir sur des variables appelées variables de commande. Il en existe de deux types :

- les variables macro-didactiques ou globales qui concernent l'organisation générale de la recherche. Les questions que le chercheur se pose sont alors du type « Quand ? Où ? Comment ? Pourquoi ? Quel type d'outil ? Quelle méthode employer dans la séquence de cours ? … » ;

- les variables micro-didactiques ou locales qui traitent de l'organisation spécifique des différentes parties de la recherche. Il s'agit alors de définir, par exemple, le type de test et les questions à poser, l'ordre de présentation des sujets à aborder dans une séquence de cours, …

Il faut noter que ces variables ne sont pas pour autant indépendantes. Il est donc essentiel de veiller à ce que les choix effectués n'entrent pas en opposition ou, du moins, qu'ils ne s'entravent pas.

Lors des analyses a priori, le chercheur pose des hypothèses sur le comportement que devraient avoir les étudiants et sur les apprentissages que l'outil ou la séquence de cours pourrait engendrer. Ces hypothèses seront validées ou non lors d'une confrontation avec l'analyse a posteriori.

Dans le cadre de cette recherche, hypothèses sont posées sur les raisonnements et préconceptions que peuvent avoir les étudiants et qui sont probablement à l'origine des erreurs commises. Ces hypothèses sont déterminées sur base de la littérature et des difficultés et méthodes explicitées par les étudiants lors des interviews. Le dispositif peut alors être créé.

Les contraintes didactiques, pédagogiques, organisationnelles, … nous ont incités à opter pour une séquence de cours informatisée composée de six vidéos, chacune associée à une série d'exercices, et de deux fiches techniques. Cette séquence de cours est mise sur une plateforme de cours de type Moodle.

Les vidéos sont construites à partir des programmes Power Point 2016, une application de Microsoft Office Professional Plus 2016 et de Windows Movie Maker 2.6. Les bandes sonores ont été enregistrées avec l'enregistreur vocal (version 10.1909.2812.0) de Microsoft Corporation et améliorées à l'aide d'un programme nommé Audacity 2.3.2

Les exercices ont été créés directement à partir des outils présents sur la plateforme. Les questions sont de types vrai ou faux, numérique, sélection de mots manquants et à réponses intégrées. Dans les questions numériques, les étudiants sont amenés à donner une réponse numérique. Les questions de type sélection de mots manquants invitent les étudiants à choisir, dans un menu déroulant, les mots manquants dans une phrase. Les questions à réponses intégrées se présentent sous la forme de textes à trous avec des réponses courtes ou numériques.

Les fiches techniques sont produites à partir du programme Power Point 2016. Elles sont disponibles en deux versions dont une en pdf. La première fiche technique a été transformée sur Moodle pour intégrer des liens cliquables et, ainsi, éviter que les informations apparaissent toutes en même temps. La seconde a été transformée en version muette avec le programme Power Point.

Il est à noter qu'une fois mise au point, les vidéos et les fiches techniques ont été une première fois visualisées, entre fin octobre et début novembre 2017, par 22 personnes impliquées dans l'encadrement des étudiants, afin de collecter leurs avis et remarques. Parmi ces participants, il y a sept professeurs/assistants de chimie ainsi que deux assistants de physique de l'Université de Namur. La cohorte des participants à l'enquête comprend également six assistants de chimie de l'Université Catholique de Louvain (UCL) ainsi que cinq enseignants de chimie à la Haute École Louvain en Hainaut de Fleurus (HELHa Fleurus) et deux enseignants formateurs de régents à la Haute École de Namur-Liège-Luxembourg (Henallux) et l'École Normale Catholique du Brabant Wallon (ENCBW). Leurs opinions ont été récoltées par écrit.

Le questionnaire qui leur a été soumis est repris en annexe 7[6]. La première partie du questionnaire porte exclusivement sur les vidéos. Pour chacune d'elles, nous avons explicité sous forme d'affirmation les objectifs visés lors de l'analyse a priori c'est-à-dire sur base des informations trouvées dans la littérature et des résultats obtenus lors de l'étude des difficultés étudiantes. Après le visionnage de chaque vidéo, les participants ont exprimé leur avis en complétant des items construits selon une échelle de Likert et se rapportant à chaque objectif. L'échelle de Likert comprend quatre choix (pas du tout d'accord - pas d'accord - d'accord - tout à fait d'accord) forçant ainsi les participants à prendre position. Pour chacune des vidéos, les participants ont également eu l'opportunité d'exprimer librement leurs avis et commentaires éventuels. La deuxième partie du questionnaire est réalisée dans la même optique, mais concernant les fiches techniques cette fois. Notons que nous n'avons pas posé de questions concernant les exercices. En effet, il nous semble nécessaire que les exercices soient évalués dans le cadre d'une expérimentation globale de la séquence de cours, en respectant l'articulation entre vidéos, fiches techniques et exercices. Or, cette dynamique n'était pas encore accessible. Enfin, la dernière partie de l'enquête, à compléter une fois l'entièreté des vidéos visionnées, interroge sur des éléments d'ordre plus général. Ces questions permettent, entre autres, d'estimer si les critères de Kay ont bien été respectés (Kay, 2014). Ces critères, sur lesquels nous revenons dans la suite de cet écrit, portent sur la contextualisation, la pertinence des explications, la minimisation de la charge cognitive et l'engagement des étudiants. Nous en avons ajouté un qui nous paraissait également important : le type d'activité. La majorité des questions comprennent une échelle de Likert et un espace pour que les participants puissent éventuellement noter

[6] Les annexes sont présentes sur le site du CeFoSciM : https://www.cefoscim.be/

leur(s) commentaire(s). Les questionnaires réceptionnés sont marqués de A à V et présents en annexe 8.
Faire tester l'outil ou la séquence par des encadrants permet d'avoir une première validation de l'outil ou de la séquence et de tenir compte d'éléments auxquels le chercheur n'aurait pas pensé ou n'aurait pas été sensibilisé.

1.3. Expérimentation

Lors de l'expérimentation, l'outil ou la séquence de cours est mis en œuvre directement auprès des étudiants. Cette expérimentation permet d'obtenir des données au travers de questionnaires, d'études de cas, des productions d'étudiants, … pendant et/ou après la séquence ou l'emploi de l'outil. Elles vont permettre de valider ou d'invalider les hypothèses posées lors des analyses a priori.

En septembre 2018, la séquence de cours a été mise en ligne et rendue accessible à tous les étudiants inscrits dans un domaine d'études scientifiques et ayant, dans leur cursus, des séances de travaux pratiques en chimie. Tout comme pour les analyses précédentes, notre étude s'est concentrée sur les étudiants inscrits en sciences pharmaceutiques et en sciences biomédicales. En début d'année académique, les listes d'étudiants dans ces options comptent 317 inscrits répartis dans des groupes comptant entre 18 et 24 étudiants.
Une annonce a été envoyée par mail et via la plateforme de cours pour demander aux étudiants de visionner les vidéos et effectuer les exercices associés. Les encadrants ont été mis au courant de l'existence de la séquence de cours et ont été invités à inciter les étudiants de leur(s) groupe(s) à l'utiliser dans le cadre de la préparation de la première séance de laboratoire. Aucun autre incitant n'a été mis en place. Suite à cette séance de laboratoire, 307 rapports ont pu être analysés.
Au mois de mars de cette même année académique, un test identique à celui qui a permis de déterminer les difficultés et logiques des étudiants a été proposé au début d'une séance de travaux pratiques. Suite aux absences et abandons, 280 étudiants ont répondu à ce test qu'ils aient effectué la séquence de cours ou pas. Pour la suite de l'analyse, une distinction est faite entre les étudiants ayant réalisé la séquence de cours en tout ou en grande partie (au moins 4 vidéos avec les exercices associés) et ceux qui ne l'ont pas fait. Lors de la séance de laboratoire dont sont issus les rapports analysés, 95 étudiants avaient suivi le cours en ligne. Ce nombre descend à 87 lors du test suite aux absences et abandons.

1.4. Analyse a posteriori et validation

Lors de cette dernière phase, les données recueillies sont analysées et confrontées aux hypothèses posées lors des analyses a priori. Il s'ensuit une validation ou une invalidation des hypothèses engendrant, respectivement, la mise en place définitive de l'outil ou de la séquence ou sa transformation en vue d'une réévaluation. Ce dernier cas nécessite une itération du processus de l'ingénierie didactique.

Les valeurs reportées dans les rapports et les tests obtenus lors de l'expérimentation sont inventoriées et les erreurs identifiées et analysées en fonction de l'opération mathématique effectuée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux de l'année 2016-2017 à l'aide d'une étude statistique pour voir l'impact de l'outil. Une validation de cet outil permettrait de corroborer les hypothèses posées sur les causes des erreurs que commettent les étudiants.

Le tableau 11 résume toutes les données reprises ainsi que le nombre de copies d'étudiants analysées dans le cadre de la validation de l'outil. Le sujet de la question de recherche porte bien entendu sur les raisonnements employés par les étudiants et leurs préconceptions lorsqu'ils reportent des résultats expérimentaux avec la précision adéquate.

Année académique	**Cours en ligne**	**Production analysée**	**Nombre de productions**
2016-2017	Non	Rapport	166
		Test	85
2018-2019	Non	Rapport	212
	Oui		95
	Non	Test	193
	Oui		87

Tableau 11 : Types et nombres de productions analysées en fonction de la participation au cours en ligne

La figure 29 reprend les différents sujets traités lors des étapes de l'ingénierie didactique.

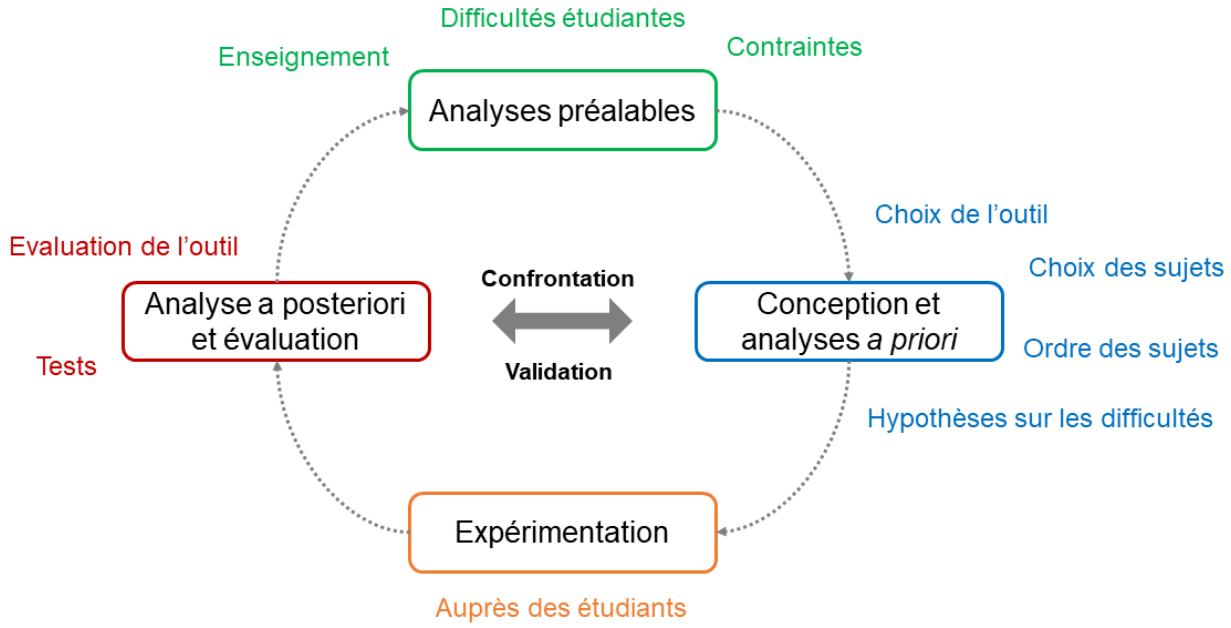


Figure 29 : Méthodologie de l'ingénierie didactique appliquée au sujet de la retranscription de résultats avec une précision adéquate

2. Les acquis techniques des étudiants lors d'une activité expérimentale

2.1. Organisation des séances de laboratoire

Notre étude porte sur l'acquisition de procédures et des connaissances théoriques nécessaires lors de l'utilisation de deux techniques de laboratoire : le titrage colorimétrique et la dilution. Elles sont travaillées dans le cadre d'un cours dont l'évaluation est continue. La figure 30 présente l'organisation des différentes activités expérimentales ; celles qui mettent en œuvre les techniques susmentionnées sont entourées et celles qui impliquent la rédaction d'un protocole expérimental, marquées d'une étoile. Dans ce cas, la seule consigne commune donnée aux étudiants est d'écrire le mode opératoire.

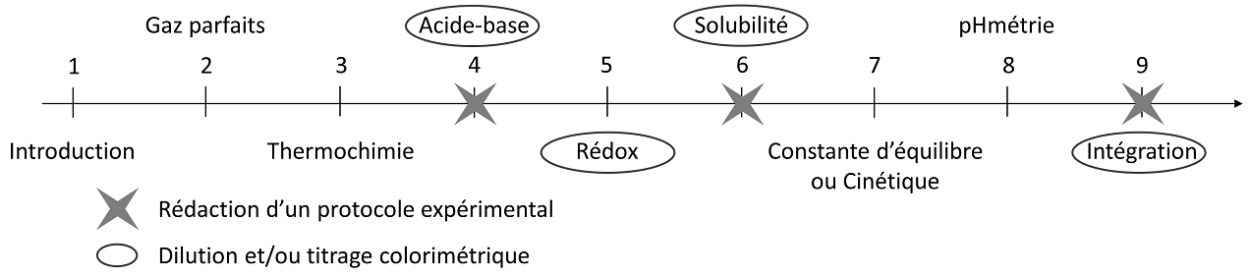


Figure 30 : Organisation des activités expérimentales

La première séance de TP (TP 4) impliquant ces deux techniques de laboratoire est un TP durant lequel l'objectif est de vérifier la teneur en hydroxyde de sodium ou en acide acétique d'un produit commercial.

Le TP 5 met en œuvre les mêmes procédures avec un protocole succinct disponible dans leur manuel. Ce TP a pour but de déterminer la concentration en eau oxygénée par titrage manganimétrique.

Le TP 6 introduit les notions de précipitation de sels et leur dissolution par complexation. Lors de cette séance, les étudiants doivent déterminer la constante de solubilité de l'hydroxyde de calcium par titrage d'une solution saturée sans excès.

Le TP 9 est appelé TP d'intégration car il est contextualisé et intègre l'une ou l'autre procédure enseignée durant l'année ainsi que différents concepts vus durant les cours magistraux. En 2016-2017, les étudiants devaient déterminer la concentration en sucres réducteurs d'une boisson énergétique. En 2017-2018, ils devaient déterminer la teneur en cuivre d'un morceau de laiton.

2.2. Analyse des protocoles expérimentaux rédigés par les étudiants

L'analyse des protocoles expérimentaux vise à répondre aux questions de recherche portant sur leur degré de détail et leur nature. Il nous paraît plus logique de déterminer la nature des éléments présents dans les protocoles rédigés par les étudiants avant d'en déterminer le degré de détail. Pour cela, une analyse praxéologique à la fois de l'ensemble des outils et livres de référence et des protocoles rédigés est faite.
En ce qui concerne le degré de détail, seule la partie des protocoles correspondant à la praxis est analysée, l'objectif de cette recherche étant orientée vers l'acquisition des techniques de laboratoire. Les cadres théoriques employés sont le modèle T4TEL, une extension du modèle praxéologique de Chevallard, et la théorie de l'activité. Cette dernière est également utilisée pour permettre une comparaison entre la tâche effectivement réalisée en laboratoire et les écrits des étudiants.

2.2.1. Les protocoles expérimentaux

Selon Abraham (2011), l'acquisition de compétences techniques se fait au travers d'instructions directives. Cependant, il a été remarqué que, si toute la procédure était donnée, l'apprentissage procédural passait au second plan par rapport à l'obtention de données. En effet, les étudiants ont tendance à croire que l'importance des séances de laboratoire réside dans le fait d'analyser correctement une série de résultats, sans nécessairement comprendre le pourquoi des procédures employées (Séré, 2002). Cette difficulté à faire des liens entre les gestes effectués et les concepts mis en jeu peut être expliquée, au moins en partie, par la tendance qu'ont les étudiants à consulter leur syllabus de TP à tout moment en cours de manipulation, y compris au milieu d'une action. Cette dernière est dès lors décomposée en étapes élémentaires, ce que Vermersch (1985) a appelé *l'atomisation de l'action*. L'objectif de la manipulation n'est alors plus la compréhension, qu'elle soit conceptuelle ou technique, mais plutôt l'obtention de résultats (Séré & Beney, 1997).
De manière à donner plus de poids aux connaissances procédurales, Séré (2002) propose de transformer les activités expérimentales afin de donner à ces connaissances un rôle d'objectif à atteindre. Dans le cadre de cette thèse, certaines séances de laboratoire ont été transformées pour permettre aux étudiants d'écrire leur propre protocole dans le but de donner du sens aux techniques de laboratoire et de leur faire acquérir les connaissances nécessaires pour les appliquer. Pour cela, des outils

présentés en annexe 18 et contenant toutes les informations nécessaires ont été mis en place. Ce sont :

- des fiches techniques succinctes reprenant les grandes étapes des procédures employées, une description sommaire des gestes à effectuer et des conseils ;
- un dossier sur les fiches techniques décrivant en détail les règles de laboratoire, les techniques de laboratoire appuyées par des éléments technologiques et la rédaction de protocoles et de rapports ;
- des vidéos présentant les techniques de laboratoire sans faire état des aspects technologiques et théoriques.

La première fois qu'il leur est demandé de rédiger le protocole, l'énoncé de l'expérience mentionne l'existence de ces outils. De plus, les étudiants ont accès, dans le fichier présentant les activités expérimentales (Annexe 19) à :

- l'énoncé de l'expérience, quelques questions ainsi que des pistes de réflexion ;
- le matériel et les substances à employer.

Pour rappel, les activités de laboratoire pour lesquelles les étudiants sont amenés à rédiger le protocole de tout ou partie de la manipulation sont les TP 4, 6 et 9.

Lors du TP 4, les étudiants disposent d'une semaine pour répondre à quelques questions, essentiellement d'ordre calculatoires, impliquant l'utilisation des principes de la dilution et du titrage, écrire un mode opératoire et le remettre à l'encadrant quelques jours avant la séance pour validation. Les préparations ont été remises aux étudiants au tout début de la séance de laboratoire. Contrairement aux TP précédents, les encadrants n'ont pas fait d'introduction. Ils ont invité les étudiants à débuter les manipulations sur base du protocole rédigé.

Dans le cadre du TP 6, la préparation consiste à répondre à quelques questions théoriques et à rédiger le protocole du titrage. La consigne donnée ne mentionne pas la technique de laboratoire à employer. Ils doivent donc faire des liens entre l'objectif de la manipulation, les concepts théoriques liés, la procédure et son utilité.

Lors du TP 9, le TP dit d'intégration, bien qu'une partie des manipulations à effectuer étaient en grande partie décrites du fait de leur complexité, les étudiants ont dû produire, afin d'établir une droite d'étalonnage, un mode opératoire pour préparer des solutions étalons et diluer la solution à doser.

Le tableau 12 ci-après reprend l'objectif de chacune des activités expérimentales et le type de travail préparatoire demandé des étudiants.

N° TP	***Objectifs généraux***	***Travail préparatoire remis avant la séance***
4	Vérifier la teneur en acide ou en base d'un produit commercial	Calculs de concentration et de facteur de dilution Rédaction des protocoles d'une dilution et d'un titrage
6	Déterminer la constante de solubilité de l'hydroxyde de calcium	Calcul de la solubilité de $Ca(OH)_2$ sur base de la valeur théorique Rédaction du mode opératoire d'un titrage
9	Déterminer la concentration en sucres réducteurs dans une boisson énergétique Déterminer la teneur en cuivre d'un morceau de laiton	Rédaction d'un protocole de préparation de solutions de concentration précise à partir d'un solide et d'une dilution

Tableau 12 : Résumé des activités expérimentales impliquant une dilution et/ou un titrage

L'analyse des protocoles expérimentaux a été menée sur deux années académiques (2016-2017 et 2017-2018). Chaque cohorte comptait une quarantaine d'étudiants inscrits en première année d'études universitaires en chimie. Ce sont, pour la plupart, des primo-arrivants, des étudiants provenant de l'enseignement secondaire et entamant des études supérieures. La caractéristique principale de ces groupes d'étudiants est leur hétérogénéité tant au niveau des connaissances théoriques que des pratiques de laboratoire. Certains étudiants entament cette formation sans avoir manipulé tandis que d'autres ont eu jusqu'à 10h de travaux pratiques (TP) en laboratoire par semaine.

Comme mentionné dans le chapitre traitant des questions de recherche, on s'attend à ce que les protocoles rédigés se présentent comme une « liste de tâches expérimentales ». Les protocoles ne sont pas censés contenir d'éléments théoriques sous-tendant les tâches à réaliser. Ils ne doivent donc surtout pas ne contenir que des éléments d'ordre théoriques. Ces derniers modes opératoires ne seraient d'aucune utilité en laboratoire au moment d'effectuer la manipulation. La question de l'évaluation du protocole expérimental dans le cadre d'un enseignement se pose. Il est en partie possible d'évaluer

la qualité de la procédure rédigée par les étudiants en utilisant certains critères (Girault, D'Ham, Ney, Sanchez & Wajeman, 2012) :

- le protocole doit être pertinent pour permettre de répondre à la question posée ;
- il doit être reproductible dans les conditions de l'expérience ;
- il doit être exécutable dans un temps imparti avec le matériel à disposition ;
- il doit être communicable. L'expérience doit pouvoir être exécutée par une autre personne.

Certains des protocoles rédigés ont effectivement été éliminés de l'analyse sur base de ces critères.

2.2.2. Méthodologie d'analyse de la nature des éléments présents dans les protocoles

La TAD est un cadre théorique ayant pour objectif d'analyser les savoirs et savoir-faire institutionnels à l'aide de la praxéologie. Dans ce cas-ci, les savoirs et savoir-faire analysés concernent les techniques de dilution et de titrage. Les outils mis à disposition des étudiants ainsi que les livres de référence contiennent les éléments de cette praxéologie reconnue par l'institution ou praxéologie de référence pour reprendre les termes employés par Croset et Chaachoua (2016). Si nous nous basons sur les éléments présents dans ces sources, la tâche correspond à l'objectif poursuivi lors de la manipulation, la technique reprend la description des gestes à effectuer, le matériel, les volumes des différences pièces,…, la technologie comprend les raisons évoquées pour expliquer les différents gestes et la théorie reprend le type de réaction en jeu, le principe général des techniques (dilution et titrage), les définitions des différents concepts impliqués, ... ainsi que la description des opérations mathématiques à effectuer avec les mesures obtenues. Il s'agit des éléments de la praxéologie liée aux techniques de laboratoire conformes aux attendus institutionnels.

Le tableau 13 (page ci-après) montre l'analyse praxéologique des sources mises à disposition des étudiants. Ce tableau est utilisé comme grille d'observations pour dénombrer les protocoles reprenant chaque élément de la praxéologie.

	Description	***Exemples***
Tâche	Objectif de l'activité	« Préparation d'une solution de concentration précise à partir d'un liquide : la dilution » « Titrage »
Technique	Actes, gestes décrits	« Rincer la pipette à l'eau déminéralisée … » « Homogénéiser la solution … » « Rincer la burette avec le réactif titrant »
Technologie	Raisons évoquées pour expliquer les gestes	« … pour éliminer les éventuelles impuretés » « … pour éviter qu'il n'y ait un gradient de concentration de la solution dans le ballon » « Ce second rinçage sert à éliminer l'eau du précédent rinçage et à éviter ainsi une dilution du titrant »
Théorie	Principe général de la technique de laboratoire, définition des différents concepts impliqués, type de réaction en jeu	« Au cours d'une dilution, la quantité de matière n n'est pas modifiée mais la concentration est diminuée par ajout de solvant » « La technique du titrage implique des réactions complètes, rapides et ayant un rendement de 100 % » « A l'équivalence, $b\,.\,n_A = a\,.\,n_B$ »

Tableau 13 : Description et exemples de tâche, technique, technologie et théorie lors de la rédaction de protocoles

Dans les protocoles rédigés par les étudiants, des éléments peuvent ne pas être conformes à la référence. Les étudiants perçoivent les techniques d'une manière qui leur est propre. Elle peut être conforme à ce qui est attendu ou pas. La praxéologie est donc personnelle. Pourtant, les tâches décrites dans les protocoles peuvent être analysées sur les mêmes bases que les outils mis à disposition des étudiants. En effet, les étudiants se sont basés sur ces derniers pour exécuter le travail demandé.

La figure 31 (page ci-après) présente le protocole d'un étudiant qui contient tous les éléments de la praxéologie. La tâche, la technologie et la théorie sont surlignées respectivement en rouge, en vert et en jaune. Les éléments techniques ne sont pas surlignés car ils constituent la majeure partie de la production.

2) Titrage par HCl

- Verser une partie de la solution d'acide chlorhydrique 1M dans un berlin.
- Préparer la burette en la rinçant à l'eau distillée puis avec du HCl préparé précédemment. Accrocher la burette sur le statif.
- Remplir la burette avec la solution de HCl en s'assurant que le robinet soit bien fermé (placer un bécher poubelle en dessous de celui-ci pour éviter tout accident) et en s'assurant d'avoir bien placé l'entonnoir
- Remplir 10 mL d'un erlenmeyer de la solution de NaOH en utilisant la pipette jaugée de 10 mL. Ce volume est prélevé depuis le ballon jaugé de 100 mL .Rincer les bords de l'erlenmeyer avec de l'eau distillée pour s'assurer qu'il ne reste pas de solution sur les bords
- Ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine dans l'erlenmeyer
- Placer l'erlenmeyer sous le robinet de la burette et placer une feuille blanche sous le récipient pour bien voir le changement de couleur (de rose à transparent).
- Ouvrir le robinet en s'assurant que la solution de chlorure d'hydrogène tombe goutte à goutte dans l'erlen. Ralentir encore la cadence à l'approche du point d'équivalence (la solution perdra sa couleur rose).
- Une fois l'équivalence atteinte, relever le volume de HCl qu'il a fallu pour neutraliser la solution basique.
- Jeter le contenu de l'erlenmeyer dans le bécher poubelle, rincer le récipient à l'eau distillée puis réintroduire 10 mL (ou plus) d'hydroxyde de sodium à la pipette graduée afin de répéter l'expérience.
- Remettre le volume dans la burette au niveau 0 en reversant de la solution de HCl.
- Répéter l'expérience autant de fois que demandé. Pour multiplier le nombre de valeurs et gagner en précision, il suffit de faire varier le volume de NaOH initial.
- Calculer la concentration de NaOH à partir des résultats des titrages (faire autant de fois le calcul qu'il y a de résultats).
- Le calcul à exécuter se trouve ci-contre, le V_{HCl} est celui qui est prélevé dans la pipette jaugée. Le V_{NaoH} est la variation de volume mesurée sur la burette

$$NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$$

$$n_{NaOH} = n_{HCl} = C_{HCl} \cdot V_{HCl}$$

$$\frac{n_{NaOH}}{V_{NaOH}} = C_{NaOH}$$

Figure 31 : Extrait d'un protocole expérimental rédigé par un étudiant (2017-2018) lors de l'analyse praxéologique

Cette première approche nous a permis de faire la distinction entre les éléments de la praxis, du savoir-faire présents dans les protocoles rédigés par les étudiants, et ceux qui font plutôt partie du logos, du savoir théorique.

2.2.3. Méthodologie d'analyse du degré de détail des protocoles

Le modèle T4TEL de Chaachoua et plus particulièrement sa description de la technique comme un ensemble de types de tâches décomposables en sous-types de tâches successives va nous permettre de nous concentrer sur la partie *praxis* des protocoles rédigés et, ainsi, de faire une analyse plus fine des éléments techniques repris par les étudiants. La structure hiérarchique de l'activité de Léontiev va alors nous permettre de caractériser les différents types de tâches. Dans le cadre d'un apprentissage technique, la procédure est considérée comme une trace d'une partie de l'activité. De plus, cette procédure est utilisée par les étudiants dans le cadre de l'activité de laboratoire comme support. Il s'agit de la tâche prescrite lors d'une dilution et d'un titrage telle que se la représentent les étudiants. Ces deux tâches impliquent des types de tâches ayant chacune un objectif scientifique c'est-à-dire des actions. Par exemple, le rinçage d'une pipette permet d'éliminer les impuretés pouvant encore être présentes. Le conditionnement subséquent sert à éviter une dilution fortuite de la solution à prélever. Chaque action peut ensuite être subdivisée en types de tâches élémentaires, en opérations qui n'ont de but que de mener à bien une action (Tableau 14, page ci-après). Pour rappel, nous considérons les opérations comme descriptibles malgré leur caractère routinier. Les exemples cités sont tirés des outils mis à disposition des étudiants. Dans cette analyse, le motif de la tâche prescrite et le but de chacune des actions sont considérés comme faisant partie du *logos*.

	Description	***Exemples***
Tâche prescrite	Réponse à un besoin, à une demande	« Préparation d'une solution de concentration précise à partir d'un liquide : la dilution » « Titrage »
Action	Type de tâche ayant un but scientifique	« Conditionner la pipette jaugée » But : Eviter une dilution fortuite
		« Faire un titrage rapide » But : Connaître approximativement le volume à l'équivalence
Opération	Type de tâche élémentaire	« - Prélever quelques millilitres du liquide dans la pipette (sur une hauteur de 5 à 10 cm) en tenant la pipette verticalement - Sortir la pipette de la solution - Incliner la pipette à l'horizontale - Enlever la propipette ou la pompe à crémaillère - Faire tourner la pipette sur elle-même - Jeter le liquide prélevé (bécher poubelle ou tourie de récupération) » « - Additionner le réactif titrant mL par mL - Arrêter l'ajout de titrant lorsque la solution change de couleur - Vider l'erlenmeyer »

Tableau 14 : Description et exemples de tâche prescrite, d'actions et d'opérations dans les protocoles

De manière à simplifier l'analyse des protocoles rédigés par les étudiants, les informations reprises dans les fiches techniques et les vidéos ont été transformées en arbre des tâches. Ces derniers ne reprennent que les informations indispensables pour effectuer la tâche. Les arbres des tâches se présentent en quatre niveaux :

- Niveau 1 : la tâche correspond à l'objectif poursuivi lors de la manipulation
- Niveau 2 : des facteurs de structuration permettent de structurer les différentes parties de la technique de laboratoire
- Niveau 3 : les actions sont des actes, des types de tâches ayant un but
- Niveau 4 : les opérations sont des types de tâches élémentaires

La distinction des actes à classer dans les différents niveaux s'est faite sur base non seulement de la structure de l'activité mais aussi de la praxéologie de Chevallard et le modèle T4TEL de Chaachoua. Lorsque, pour un type de tâche donné (praxis), il existe un élément de technologie le justifiant (logos), nous avons considéré ce geste comme une action. Les types de tâches élémentaires sont des opérations. Ces dernières sont alors considérées comme descriptibles malgré leur caractère routinier.
La figure 32 ci-dessous présente l'organisation générale d'un arbre des tâches.

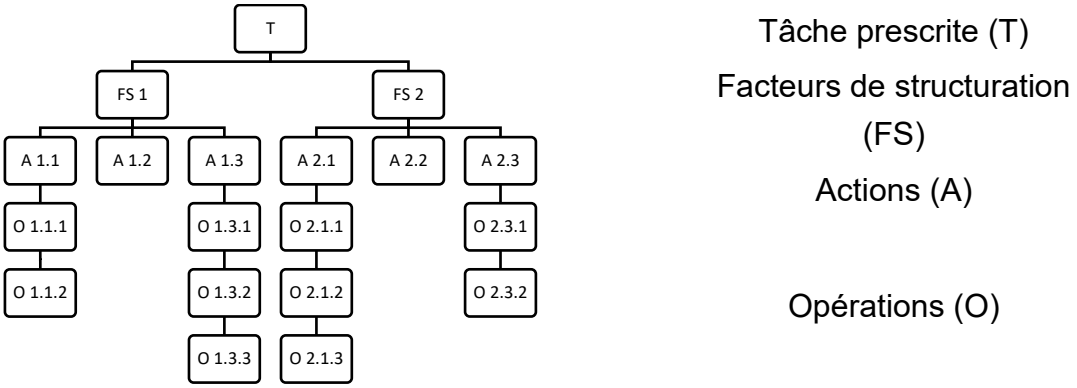


Figure 32 : Organisation générale d'un arbre des tâches d'après Girault et al. (2012)

Les figures 33 et 34 (pages 115 – 116) reprennent les arbres des tâches construits, pour chacune des deux techniques de laboratoire, sur base des outils mis à disposition des étudiants.
Pour une question de lisibilité, certaines opérations sont décrites succinctement dans les cases.
Les protocoles sont analysés à l'aide de quatre arbres des tâches : un pour chaque dilution et chaque titrage. Les arbres des tâches sont utilisés comme des grilles d'observation.

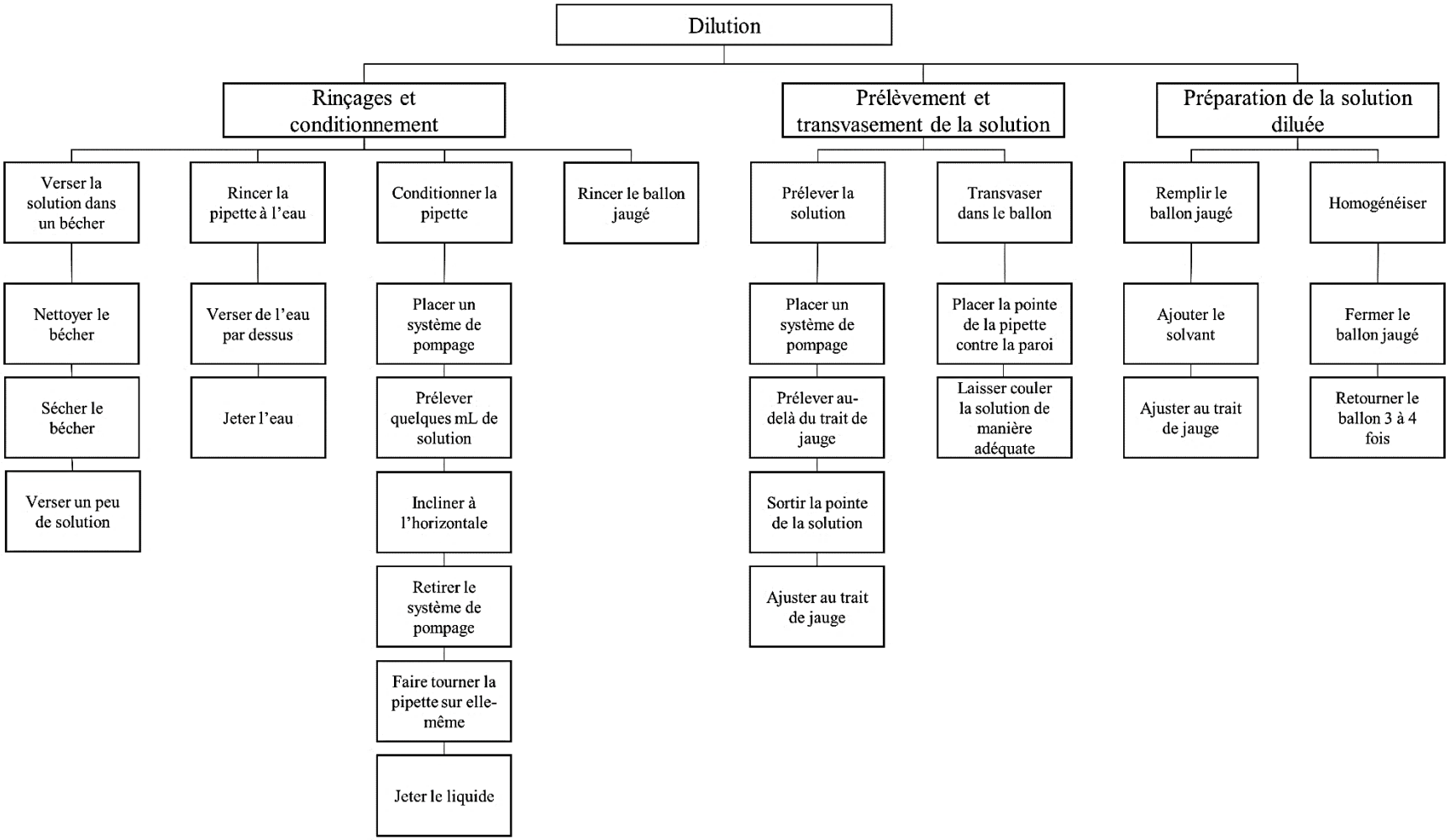


Figure 33 : Arbre des tâches correspondant à une dilution

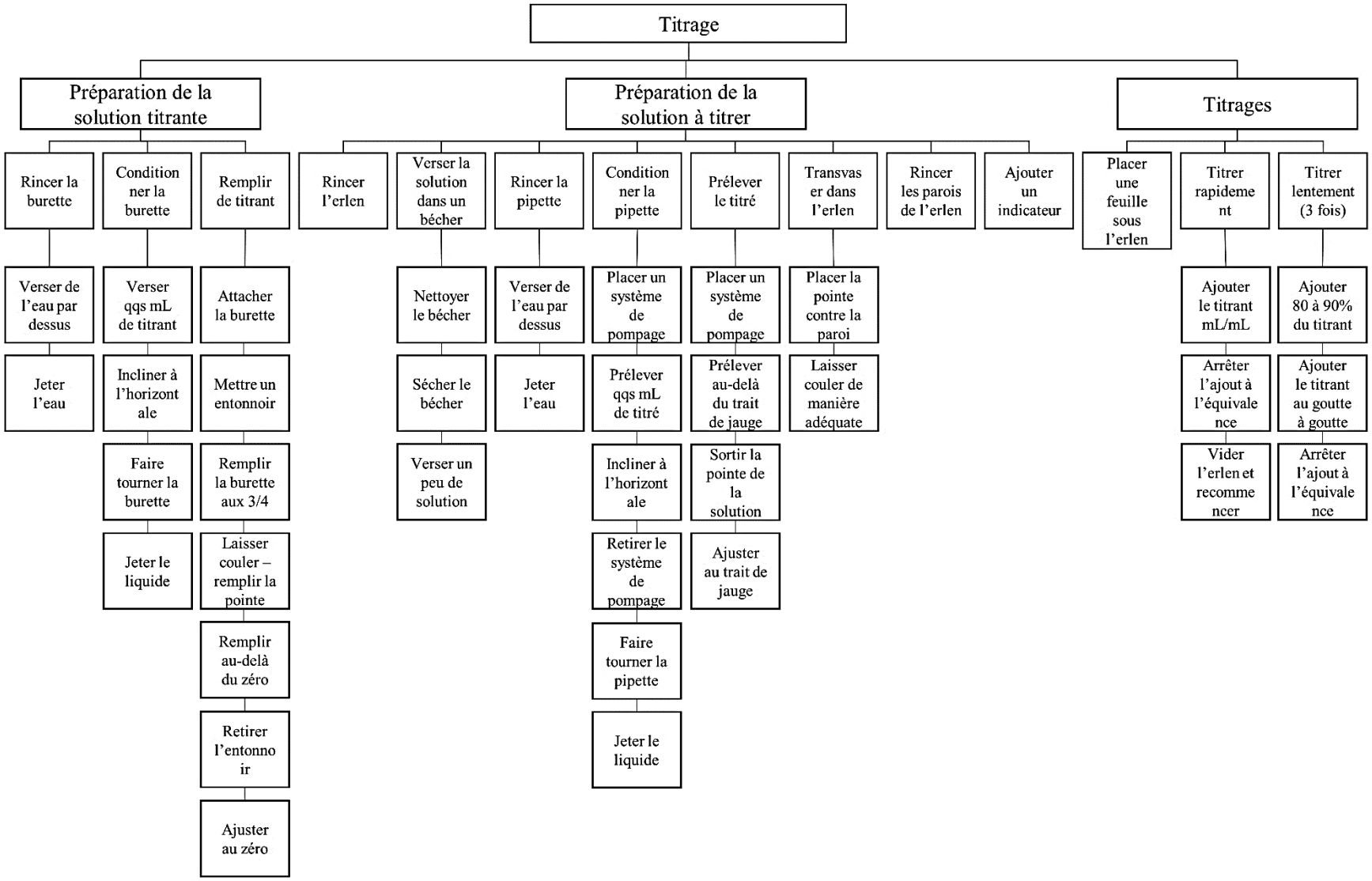


Figure 34 : Arbre des tâches correspondant à un titrage colorimétrique

Le tableau 15 résume les deux méthodologies employées lors de l'analyse des protocoles rédigés par les étudiants.

Sujet de la question de recherche	***Cadres théoriques***	***Grilles d'observation***	***Données obtenues***
Nature des éléments présents	TAD et T4TEL	Tableaux décrivant la tâche, la technique, la technologie et la théorie pour chaque technique de laboratoire	Pourcentages d'étudiants incluant chaque élément de la praxéologie dans le protocole
Degré de détail des protocoles	T4TEL et théorie de l'activité	Arbres des tâches décrivant chaque technique de laboratoire	Pourcentages d'étudiants incluant chaque élément des arbres des tâches, ces derniers se focalisant plus particulièrement sur la praxis

Tableau 15 : Résumé des méthodologies employées lors de l'analyse des protocoles

Ces deux analyses sont réalisées sur les protocoles rédigés à l'occasion du TP 4. Dans le cadre d'un apprentissage technique, il serait intéressant de regarder à l'évolution au cours d'une année académique. Les étudiants ont donc également rédigé des protocoles lors des TP 6 (titrage) et TP 9 (dilution). Une comparaison est faite entre ces protocoles décrivant les dilutions d'une part et les titrages d'autre part.

Le tableau 16 reprend les nombres de protocoles analysés lors de chaque TP. Ces nombres ne correspondent pas à la totalité des écrits reçus car certains d'entre eux ont été éliminés sur base des critères présentés au point 2.2.1 de ce chapitre.

	Dilution	***Titrage***
TP 4	69	74
TP 6 et 9	67	71

Tableau 16 : Nombre de protocoles analysés lors de chaque TP

2.3. Impact du protocole sur la tâche effective des étudiants lors des activités expérimentales

Une analyse des protocoles rédigés par les étudiants ne suffit pas pour déterminer s'ils ont des acquis techniques. Il est aussi nécessaire de les observer en laboratoire lors de la réalisation des techniques. Il est alors possible de regarder s'il y a une corrélation entre la tâche qu'ils effectuent en laboratoire, qui est appelée la tâche effective, et leurs écrits.

Un autre élément est vérifiable grâce à ces observations : l'impact du protocole. Cela peut être fait en comparant la tâche effective réalisée lors d'un TP pour lequel les étudiants ont rédigé un protocole (TP 4) et lors d'un TP dont un protocole succinct est fourni (TP 5).

Enfin, les données obtenues lors de cette comparaison permettent également d'étudier la conformité des tâches réalisées par les étudiants. Il s'agit alors de mettre en parallèle la tâche effective (réalisée par les étudiants) et la tâche prescrite (reconnue institutionnellement). Les gestes techniques correspondant à cette dernière sont repris dans les arbres des tâches.

2.3.1. Aspects généraux

Lors des années académiques 2017-2018 et 2018-2019, les étudiants (une quarantaine chaque année) ont été amenés à rédiger les protocoles d'une dilution et d'un titrage colorimétrique dans le cadre du TP 4. Lors du TP 5, les deux techniques sont décrites succinctement dans le syllabus de laboratoire (Figure 35).

C.1 Dilution de la solution de peroxyde d'hydrogène

- La solution de peroxyde d'hydrogène mise à votre disposition est trop concentrée pour être titrée directement. Diluer 10 fois cette solution. Préparer 100,0 mL de solution diluée.
- Préparer une nouvelle solution diluée identique si ces 100,0 mL ne suffisent pas pour tous les titrages à réaliser.

C.3 Titrage manganimétrique

- Introduire 10,00 mL de peroxyde d'hydrogène et 10 mL d'acide sulfurique (sulfate d'hydrogène) 5 M dans un erlen de 100 mL
- Titrer au moyen de permanganate de potassium de concentration connue (voir tableau du labo)
- Exécuter trois fois ce titrage

Figure 35 : Protocole de la dilution et du titrage à réaliser lors du TP 5

Pour observer les étudiants lors de la réalisation des tâches, ils sont filmés à l'aide de caméras de type GoPro lors de ces deux TP. Le tableau 17 reprend le nombre d'étudiants filmés chaque année lors des différentes activités. Entre parenthèses se trouvent les nombres d'étudiants qui ont été filmés aux TP 4 et 5. Ce ne sont pas toujours les mêmes étudiants qui sont filmés pour cause d'absence à l'une ou l'autre séance. Tous les étudiants filmés étaient volontaires.

	2017-2018	***2018-2019***
TP 4	10	12
TP 5	10 (9)	13 (9)

Tableau 17 : Nombre d'étudiants filmés lors de chaque activité et chaque année académique

Les caméras Gopro sont placées dès le début de l'activité et mises en route, dans la mesure du possible, avant que ne débute la partie de la manipulation d'intérêt. Elles tournent durant la majeure partie de la manipulation. Les vidéos obtenues sont ensuite montées à l'aide du logiciel Windows Movie Maker 2.6 pour ne reprendre que la préparation du matériel, la dilution, le titrage rapide et le premier titrage lent. Les vidéos débutent donc avec la préparation du matériel et se terminent sur la lecture du volume de solution nécessaire pour atteindre l'équivalence lors du premier titrage lent. Aucune séquence n'est coupée entre les deux. Dans le cadre de cette recherche, les étudiants ont été renommés.

Les actes exécutés par les étudiants ont été répertoriés dans des arbres des tâches présentés dans les figures 36 et 37 (pages 120 – 121) pour chacune des techniques et lors de chacun des TP. Des cases y sont hachurées car elles :

- désignent le nom de la technique à réaliser (Dilution, Titrage) ;
- reprennent des facteurs de structuration et ne sont dès lors pas visibles lors des TP (Rinçages et conditionnement, Prélèvement et transvasement de la solution, …) ;
- décrivent un acte qui n'est pas différenciable de l'action correspondante (L'opération « Verser un peu de solution » n'est pas différentiable de l'action « Verser la solution dans un bécher ») ;
- décrivent un acte qui n'est pas toujours clairement visible sur les vidéos (Placer la pointe de la pipette contre la paroi, Sortir la pointe de la solution, ...).

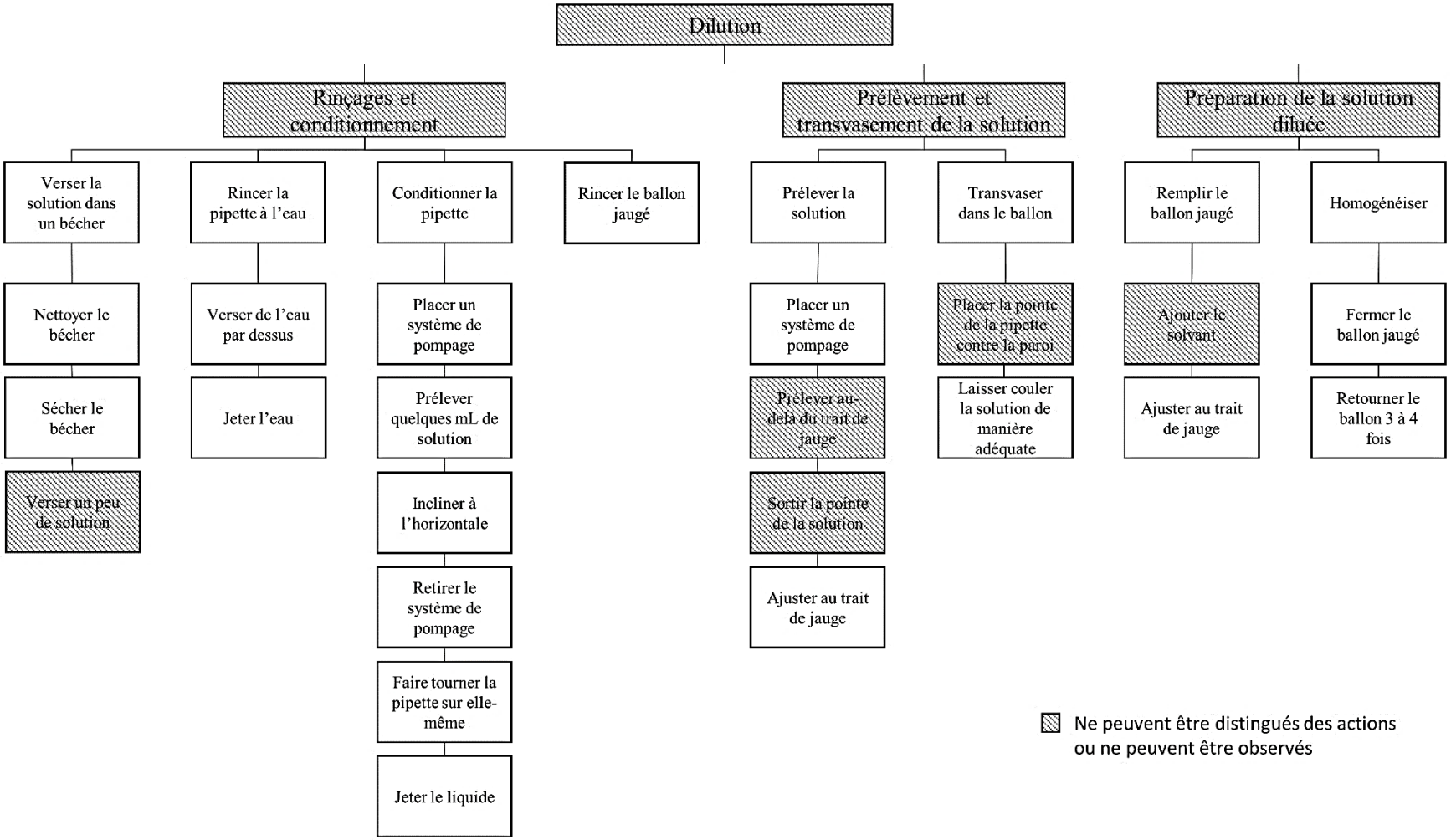


Figure 36 : Arbre des tâches présentant la technique de la dilution dans le cadre d'une analyse de la tâche effective

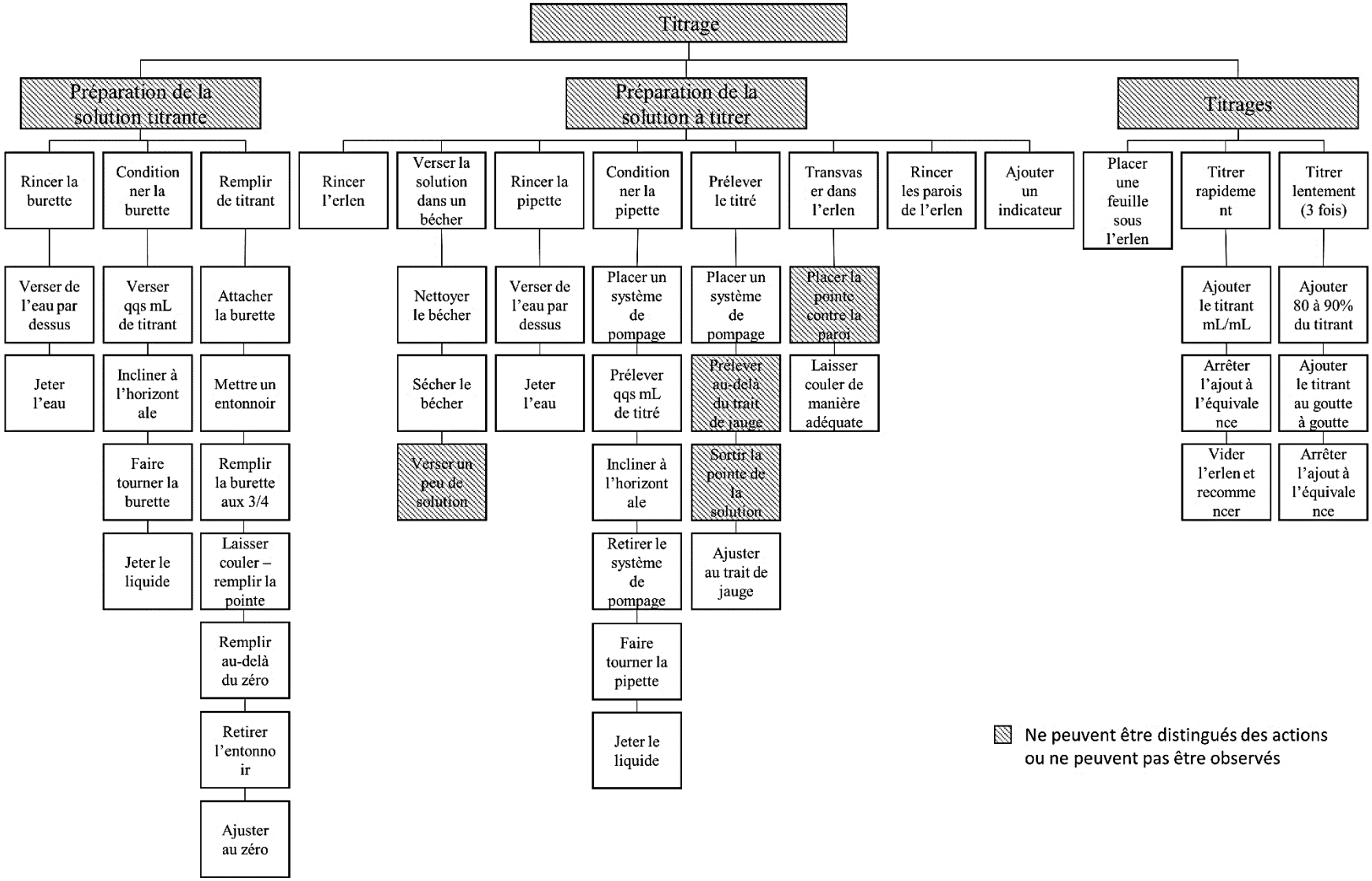


Figure 37 : Arbre des tâches présentant la technique du titrage colorimétrique dans le cadre d'une analyse de la tâche effective

L'analyse a été faite en comptant le nombre d'étudiants ayant exécuté chaque geste dans le cadre des deux techniques lors des TP 4 et 5.
Par exemple, si un étudiant conditionne une pipette jaugée en la remplissant entièrement et en la vidant, les gestes « Prélever quelques millilitres de solution », « Incliner à l'horizontale » et « Faire tourner la pipette sur elle-même » ne sont pas exécutés. Si, lors d'un prélèvement à l'aide d'une pompe à crémaillère, l'étudiant appuie sur la crémaillère pour transvaser la solution prélevée dans le ballon jaugé ou l'erlenmeyer, le geste « Laisser couler la solution de manière adéquate » est considéré comme non effectué. En ce qui concerne plus particulièrement le titrage, les opérations « Remplir la burette aux 3/4 » et « Laisser couler – remplir la pointe » ne sont pas exécutées si l'étudiant omet de remplir la partie effilée de la burette. De même en est-il de l'opération « Arrêter l'ajout à l'équivalence » lors du titrage lent si l'étudiant dépasse l'équivalence et prend note du volume obtenu.

2.3.2. Adéquation entre la tâche décrite dans les protocoles rédigés et la tâche réalisée lors d'un TP impliquant la rédaction d'un protocole expérimental

La tâche effectuée par les étudiants lors du TP 4 (= tâche effective) est comparée à la tâche telle que décrite dans les productions écrites. Cependant, les gestes des étudiants ne sont pas comparés à leur production de manière individuelle car la tâche effectivement réalisée par un étudiant est souvent différente de ce qu'il a décrit pour diverses raisons :

- l'étudiant est en relation avec ses pairs et l'encadrant, engendrant des changements dans la manière dont il perçoit et exécute la tâche ;
- la production des étudiants a été corrigée. La correction peut avoir un impact sur les actes effectués par les étudiants.

L'analyse est réalisée en comparant les arbres des tâches obtenus respectivement suite à l'analyse des protocoles et suite à l'observation de la tâche effectuée en laboratoire. Les catégories dans lesquelles sont classés les différents gestes étant différents dans les deux analyses du fait du nombre d'étudiants impliqués, cette comparaison se veut purement qualitative.

2.3.3. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors de TP

La tâche prescrite est la tâche telle que prévue par l'institution. La tâche effective est la tâche réalisée par l'étudiant. Elle se distingue de l'activité car elle ne reprend que les gestes en lien avec la tâche prescrite. Aucune mention des interactions ou des vécus des étudiants n'est faite sauf lorsqu'il est nécessaire d'en faire mention pour expliquer une observation.

L'objectif est de comparer les gestes effectivement réalisés par les étudiants aux prescrits institutionnels, à la tâche prescrite. Cette dernière est décrite dans les arbres des tâches qui servent alors de grilles d'observation. Une comparaison est ainsi faite entre la tâche prescrite reprise dans les arbres des tâches et la tâche réellement exécutée par l'étudiant.

2.3.4. Comparaison entre les tâches effectives réalisées lors d'un TP impliquant la rédaction d'un protocole (TP 4) et lors d'un TP pour lequel un protocole succinct est fourni (TP 5)

Une comparaison est aussi faite entre les gestes réalisés lors d'un TP pour lequel ils ont dû rédiger le protocole expérimental (TP 4) et ceux exécutés lors d'un autre TP pour lequel le protocole est fourni (TP 5). L'objectif est donc de comparer les arbres des tâches obtenus suite à l'analyse des deux activités. Nous espérons ainsi déterminer l'impact que peut avoir la rédaction du protocole expérimental sur l'acquisition des techniques de laboratoire. Il est cependant probable qu'il y ait un apprentissage technique et/ou conceptuel lors du premier TP impliquant les techniques d'intérêt (TP 4). Nous pensons néanmoins qu'il est limité. Entre deux TP, les étudiants n'ont pas l'occasion de s'entraîner aux techniques de dilution et de titrage. Or, pour acquérir des connaissances techniques, il est nécessaire de répéter les procédures. Une comparaison des gestes techniques effectués lors des TP 4 et 5 permettrait donc de voir plus particulièrement le type d'acquis des étudiants dû à la rédaction du protocole.

Le tableau 18 (page ci-après) reprend les questions de recherche et les méthodologies employées pour y répondre.

Sujet des questions de recherche	***Grilles d'observations***	***Données***
Corrélation entre les protocoles rédigés et la tâche effective	Arbres des tâches obtenus suite à l'analyse des protocoles lors du TP 4 et Arbres des tâches obtenus suite à l'observation de la tâche effective lors du TP 4	Comparaison des pourcentages de manière qualitative
Conformité de la tâche effective	Arbres des tâches considérés comme description de la tâche prescrite	Pourcentages d'étudiants réalisant les gestes décrits dans les arbres des tâches lors du TP 4 d'une part et lors du TP 5 d'autre part
Impact du protocole sur la tâche effective	Arbres des tâches obtenus suite à l'analyse des tâches effectives lors des TP 4 et 5	Comparaison des nombres d'étudiants réalisant les différents gestes techniques lors des TP 4 et 5

Tableau 18 : Résumé des méthodologies employées lors de l'analyse de la tâche effective

2.4. Analyse de l'activité des étudiants lors des activités expérimentales impliquant les techniques de dilution et de titrage

Conformément à ce que certains courants issus de la théorie de l'activité rapportent, il y a plus que la tâche prescrite ou la tâche effective lors d'une activité. On peut alors se demander de quoi est réellement composée l'activité des étudiants en laboratoire. Ils exécutent des gestes, agissent mais leurs actes ne correspondent pas toujours à la tâche à réaliser. Comment expliquer ces actes ? Pourquoi les étudiants les réalisent-ils ? Dans cette partie de la recherche, les questions auxquelles nous cherchons réponse concernent :

- les actes des étudiants autres que la tâche effective ;
- les ressources employées par les étudiants ;
- la raison d'être de ces différents actes.

2.4.1. Activité des étudiants en laboratoire : catégorisation des actes

Cette recherche a été menée lors des années académiques 2017-2018 et 2018-2019 auprès de 29 étudiants inscrits en première année et 5 étudiants inscrits en deuxième année d'études en sciences chimiques. Ces derniers étudiants permettent de comparer l'activité d'étudiants novices avec celle d'étudiants ayant déjà une certaine expertise. Les étudiants sont filmés lors d'activités impliquant les techniques de dilution et de titrage. En première année, les TP filmés sont les mêmes que décrits précédemment. En deuxième année, les étudiants ont été filmés lors d'une activité dont l'objectif était de déterminer la concentration en acide ascorbique (= vitamine C) d'une solution par titrage iodométrique. Le protocole de l'activité est repris à la figure 38. La technicité en est totalement absente.

A. Solution titrante = KIO_3

— Introduire 10,00 mL de la solution inconnue dans un erlenmeyer

— Y ajouter 10 mL de KI à 2 % et 10 mL de H_2SO_4 2,5 M

— Titrer par la solution de KIO_3.

B. Solution titrante = acide ascorbique

— Introduire 10,00 mL de la solution de KIO_3 dans un erlenmeyer

— Y ajouter 10 mL de KI à 2 % et 10 mL de H_2SO_4 2,5 M

— Titrer par la solution d'acide ascorbique de concentration inconnue.

Figure 38 : Protocole mis à disposition des étudiants en deuxième année d'études en chimie lors du dosage de l'acide ascorbique[7]

Ce TP se déroule aux alentours du mois de novembre et est en deux parties. Elles impliquent toutes deux de titrer l'acide ascorbique par l'iodate de potassium (KIO_3). Pour réaliser la première partie, les étudiants doivent exécuter le dosage en mettant la solution d'iodate dans la burette. Dans la seconde partie, il leur est demandé de mettre l'acide ascorbique dans la burette. La partie filmée est la seconde. Ils sont amenés à diluer la solution d'acide ascorbique pour des raisons de précision et d'exactitude. Le facteur de dilution ne leur est pas fourni. Ils doivent le déterminer sur base des résultats obtenus lors du titrage précédent.

Le tableau 19 (page ci-après) reprend le nombre d'étudiants filmés chaque année lors des différentes activités. Entre parenthèses se trouvent les nombres d'étudiants qui ont

[7] Il y a une erreur dans le syllabus. La solution titrante est toujours l'iodate de potassium (KIO_3) car c'est la solution dont la concentration est connue. Ce qui change, c'est la solution mise dans la burette : le KIO_3 dans la première partie de la manipulation et l'acide ascorbique dans la seconde.

été filmés aux TP 4 et 5. Ce ne sont pas toujours les mêmes étudiants qui sont filmés pour cause d'absence à l'une ou l'autre activité.

	2017-2018	***2018-2019***
TP 4	10	12
TP 5	10 (9)	13 (9)
Acide ascorbique	/	5

Tableau 19 : Nombre d'étudiants filmés lors de chaque activité et chaque année académique

Comme pour l'analyse précédente, les vidéos sont traitées avec le logiciel Sonal (version 2.0.99). Les différents moments de l'activité visible sont classés dans des catégories décrites dans le tableau 20. Ces catégories ont été créées sur base de l'observation de l'activité des étudiants en laboratoire.

Catégories		***Description***
Technicité	Préparation du matériel	Prise de matériel dans la paillasse ou sur une paillasse générale
	Dilution	Réalisation d'une action de la dilution
	Titrage	Réalisation d'une action du titrage
Interaction	Aide un pair	Réponse à une question d'un pair ou aide à la manipulation
	Aide reçue d'un pair	Réponse d'un pair à une question ou aide d'un pair lors d'une manipulation
	Aide de l'encadrant	Réponse de l'encadrant à une question ou une demande d'aide pour un geste technique
Lecture de la procédure de laboratoire		Consultation de la procédure de laboratoire
Sans thématique		Acte effectué ne pouvant pas être classé dans les catégories précédentes
Gestes parasites		Réalisation d'un acte non nécessaire pour mener à bien la manipulation (ex. : rincer le bécher servant de poubelle, discuter de ses hobbies, regarder d'autres étudiants, …)

Tableau 20 : Description des catégories utilisées pour classer les moments de l'activité filmée

Une fois la catégorisation des différents actes réalisée, l'activité des étudiants est reprise sous forme de diagrammes circulaires représentant la proportion de chacune des catégories de gestes comme décrit dans la figure 39.

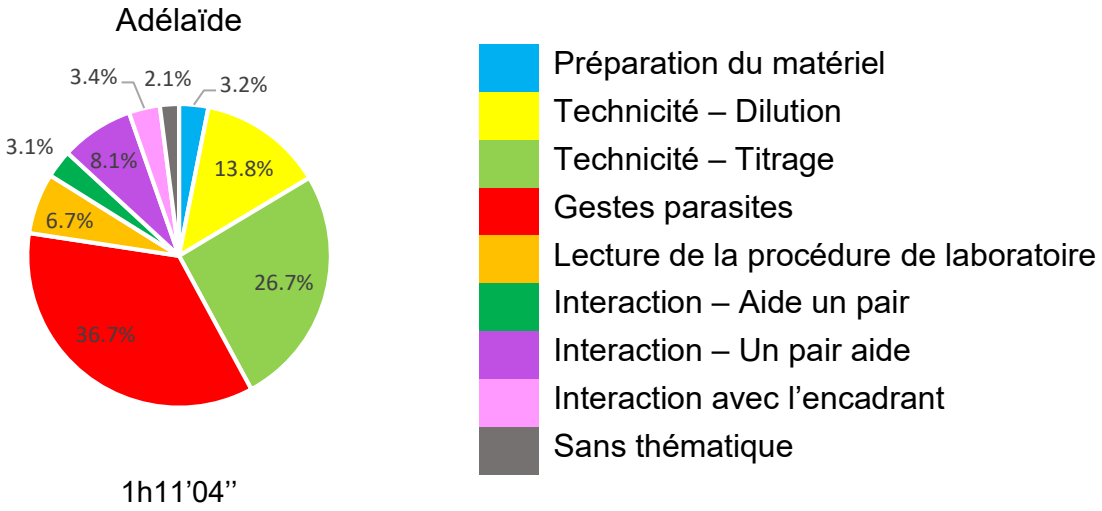


Figure 39 : Exemple de diagramme circulaire représentant la proportion de chacun des gestes lors d'une activité expérimentale

Les données sont reprises en pourcentages car la durée de l'activité filmée est différente pour chaque étudiant.
Pour chaque TP, une analyse qualitative de ces diagrammes est réalisée. Les différences et similitudes sont relevées. L'activité des étudiants lors des différents TP (TP 4, 5 et acide ascorbique) est également comparée. Pour cela, les proportions des catégories de gestes lors de trois TP sont mis en parallèle à l'aide de diagrammes en bâtonnets reprenant la moyenne de ces proportions.

2.4.2. Détermination des ressources employées et des fonctions remplies par les différents actes

En 2018-2019, en plus d'être filmés, certains étudiants ont accepté de participer à un entretien d'autoconfrontation leur permettant de revivre et d'expliquer leur vécu en laboratoire. Ces étudiants sont au nombre de 5 lors du TP 4, 4 lors du TP 5 et 4 lors du TP de deuxième année. Ces étudiants visionnent leur vidéo. Il leur est demandé de décrire ce à quoi ils pensaient au moment de l'action en laboratoire. Les entretiens ont été menés par des étudiants inscrits en master de spécialisation en accompagnement des professionnels de l'éducation, du management, de l'action sociale et de la santé ainsi que leur enseignante. Les entretiens ont duré entre 52' et 1h56'. La principale raison de ne pas mener les entretiens moi-même est la crainte que les étudiants ne soient

influencés par la relation existante entre eux et moi. Ils me connaissent en tant qu'encadrante de séances d'exercices et de laboratoire. Il était donc possible qu'ils ne mentionnent pas véritablement leur vécu de peur d'être jugé.

Après retranscription, les entretiens ont été remis en corrélation avec les différentes actions effectuées et ont été analysés en s'intéressant aux différents référents utilisés lors de l'activité. Nous appelons référent tout élément ou personne susceptible de fournir une information ou aide à l'étudiant, c'est-à-dire leurs ressources. Les différents référents sont employés quel que soit le moment de l'activité et ont des fonctions très diverses. Beaucoup de ces fonctions permettent d'expliquer l'existence de quelques gestes parasites et les raisons pour lesquelles certains gestes techniques sont réalisés.
Le tableau 21 reprend les méthodes de recueil de données et les résultats obtenus suite à l'analyse de l'activité des étudiants lors des séances de laboratoire.

Sujet des questions de recherche	***Recueil de données***	***Données***
Actes des étudiants lors de l'activité	Vidéos et catégorisation des actes	Diagrammes reprenant les proportions de chacune des catégories d'actes
Ressources employées par les étudiants	Vidéos et entretiens d'autoconfrontation	Noms des ressources, appelées référents, auxquelles se réfèrent les étudiants pour effectuer les différents actes
Fonctions des actes réalisés	Entretiens d'autoconfrontation	Raisons données aux actes sur base des référents utilisés

Tableau 21 : Résumé des méthodologies employées lors de l'analyse de l'activité

Chapitre 5
Analyses préalables

Ce chapitre traite des analyses préalables liées à la construction d'un dispositif d'enseignement dont le sujet est le report de résultats expérimentaux avec la précision adéquate. Les questions de recherche qui y sont abordées portent sur :

- la légitimité du savoir enseigné ;
- les difficultés des étudiants lors du report de leurs résultats expérimentaux ;
- les méthodes employées par les étudiants pour retranscrire ces résultats avec une précision adéquate.

1. Légitimité du savoir

1.1. Les contraintes

L'outil doit être construit en tenant compte de différentes contraintes. Ces dernières sont, entre autres, d'ordre organisationnelles, cognitives et didactiques.

Les premières contraintes sont organisationnelles. La matière à enseigner en première année d'études supérieures dans un domaine scientifique est imposante. Il y a quantité de notions, de concepts, de théories, … à aborder. Or, la tendance actuelle est à la diminution des heures en présentiel. L'outil proposé se doit donc de pouvoir être employé en autonomie en dehors des heures prévues dans l'horaire des étudiants.

Les contraintes cognitives concernent essentiellement les étudiants eux-mêmes. Ils proviennent d'horizons différents, ont des acquis, des capacités et des aspirations différentes. Il est donc nécessaire que l'outil convienne au plus grand nombre et qu'il revienne sur les bases de la matière concernée. Du point de vue des acquis, malgré un programme identique, les étudiants, suivant l'école dont ils proviennent et les enseignants qu'ils ont eus, ne sont pas égaux.

Les contraintes didactiques se situent à différents niveaux. Les conceptions sur la matière et les éventuelles connaissances antérieures des étudiants ont un impact sur la conception de l'outil. Par exemple, la plupart des étudiants connaissent l'arrondi arithmétique. Or, en sciences expérimentales, la méthode d'arrondi la plus employée est l'arrondi bancaire. Il faut en tenir compte lors du choix des exemples numériques utilisés dans l'outil. Il faut aussi tenir compte de la manière de travailler des étudiants. Dans l'enseignement, actuellement, les activités sont variées pour permettre un apprentissage via divers canaux. Les étudiants sont donc habitués à changer d'activité de manière régulière même en plein milieu d'une période de cours. Les dernières contraintes sont liées aux transformations que subit le savoir pour être rendu enseignable c'est-à-dire à la transposition didactique.

1.2. La transposition didactique

Comme mentionné auparavant, la transposition didactique est un processus d'adaptation du savoir savant pour le rendre enseignable. Les transformations du savoir engendrées peuvent avoir un impact sur la compréhension qu'ont les étudiants de ce savoir.

Pour rappel, la transposition didactique présente deux processus de transformations : un externe et un interne. L'objectif étant de construire une séquence de cours et non d'étudier la manière dont un ou des professeurs ou encadrants enseignent cette matière, seule les transformations et impacts de la transposition didactique externe sont présentés dans ce paragraphe.

Les règles présentées à l'Université de Namur sont les suivantes :

- Le résultat d'une addition et/ou d'une soustraction compte autant de décimales que le terme du calcul qui en comporte le moins
- Le résultat d'une multiplication et/ou d'une division compte autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul qui en comporte le moins

Elles sont reprises dans divers livres de référence universitaires (Hecht, 2000; Skoog et al., 1997; Sternheim & Kane, 1991; Tro, 2015; Young & Geller, 2006) et représentent une première approche pour retranscrire des résultats avec une précision adéquate.

Lors de la présentation de la méthode experte au chapitre 2, le premier point abordé est la notion d'incertitude. Il est facilement remarquable que les règles employées ne laissent presque plus apparaître de lien avec l'incertitude des appareils de mesure. Or, c'est l'incertitude qui est en lien avec ce que nous nommons la « précision ». En effet, cela correspond à la position décimale du premier chiffre non nul de l'incertitude. Sur l'exemple de la latte (Figure 13) présenté au chapitre 2, l'incertitude donnée est de 0,1 cm. La valeur de la mesure a donc une précision de l'ordre du dixième. En voyant les règles, un étudiant débutant des études dans un domaine scientifique peut avoir des difficultés à comprendre ce qui se cache derrière le terme « précision ».

Pourtant, la notion d'incertitude est souvent présentée préalablement aux règles mais sans faire de lien. Il en est de même pour l'une des méthodes proposées pour tenir compte de la propagation des incertitudes. Pour calculer l'incertitude sur le résultat d'une somme ou d'une différence de mesures, il est habituel de sommer les incertitudes absolues. Lorsque l'opération mathématique est une multiplication et/ou une division, ce sont les incertitudes relatives qui sont sommées.

Prenons un exemple. Pour les opérations d'addition et de soustraction, imaginons le calcul de l'enthalpie de la réaction entre un acide fort et une base forte en solution :

$$\Delta H = -285{,}83 + 230{,}0 = -55{,}8\ kJ.mol^{-1}$$

Les valeurs d'incertitudes absolues sont respectivement les suivantes :

$$U(\Delta H_1) = 0{,}01\ kJ.mol^{-1} \qquad U(\Delta H_2) = 0{,}1\ kJ.mol^{-1}$$

L'incertitude absolue sur le résultat est donc la suivante :

$$U(\Delta H) = 0{,}1 + 0{,}01 = 0{,}11\ kJ.mol^{-1}$$

Cette valeur d'incertitude est indicative d'une précision au dixième. La valeur de variation d'enthalpie à reporter est de - 55,8 kJ.mol^{-1}. Il n'est pas nécessaire de déterminer la valeur de l'incertitude relative pour déterminer la précision de ce résultat. La détermination de l'incertitude absolue sur le résultat d'opérations de multiplication et de division est plus complexe car, les valeurs ne présentant pas les mêmes unités, leurs incertitudes absolues ne peuvent être additionnées. Il est alors nécessaire de calculer les incertitudes relatives sur chacune de ces valeurs. Prenons le calcul d'une quantité de matière en carbone :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1{,}634}{12{,}011} = 0{,}136041 \ldots mol$$

L'incertitude relative de chacune des valeurs se calcule comme suit :

$$\Delta m = 0{,}001\ g \ \Rightarrow\ \frac{\Delta m}{m} = \frac{0{,}001}{1{,}634}.100 = 6.10^{-2}\%$$

$$\Delta M = 0{,}001\ g.mol^{-1} \ \Rightarrow\ \frac{\Delta M}{M} = \frac{0{,}001}{12{,}011}.100 = 8.10^{-3}\%$$

L'incertitude relative sur le résultat s'obtient en faisant la somme des valeurs précédentes :

$$\frac{\Delta n}{n} = 6.10^{-2} + 8.10^{-3} = 7.10^{-2}\%$$

L'incertitude absolue sur le résultat est donc :

$$\Delta n = \frac{7.10^{-2}}{100}.0{,}136041 \ldots = 9.10^{-5} mol$$

La valeur reportée de la quantité de matière est 0,13604 mol.

Cette méthode est plus demandeuse tant de la durée mise pour l'appliquer que de la charge cognitive engendrée. Néanmoins, il arrive même que ce soit plutôt la méthode

faisant appel à la racine carrée de la somme quadratique des incertitudes, absolues ou relatives suivant l'opération mathématique envisagée, qui soit exposée. On peut alors se poser la question, si le but est d'utiliser les règles susmentionnées, du lien existant avec ces méthodes de détermination des incertitudes absolues ou relatives du résultat. En effet, les règles ne mentionnent à chaque fois qu'une seule valeur : celle qui comporte le moins de décimales ou de chiffres significatifs. Serait-ce une tentative de présenter un savoir plus proche du savoir savant ? La question reste posée.

C'est également lors de ce processus de transposition didactique externe qu'apparaissent des notions absentes du savoir savant. C'est le cas de la notion de « chiffres significatifs ». Ils sont généralement définis comme constitués des chiffres connus avec certitude et du premier chiffre incertain, ce dernier étant en lien direct avec l'incertitude de mesure. Il correspond au chiffre présent à la position décimale du premier chiffre non nul de l'incertitude, d'où le lien généralement fait entre chiffre significatif et précision. Cela pourrait donc expliquer l'ambiguïté présente dans le langage courant : parler d'« erreur de chiffre significatif » pour désigner une erreur de précision.

Toutes ces transformations du savoir peuvent engendrer un manque de sens des règles employées. En effet, si le lien entre l'incertitude absolue et le terme de décimale peut être fait facilement, il n'en est pas de même entre la notion de chiffre significatif et l'incertitude relative. Ainsi, la règle à appliquer lors des opérations d'addition et de soustraction semble plus facile à comprendre et à assimiler que ne l'est celle à employer lors des opérations de multiplication et de division.

2. Détermination des difficultés étudiantes

Les transpositions didactiques externes et internes ne sont pas les seules transformations que subit le savoir. Une fois enseigné, ce savoir doit encore devenir effectif. Il est alors modifié par l'apprenant lui-même de par les acquis et les préconceptions qu'il peut avoir. Cela peut engendrer diverses difficultés que cette partie de la recherche tente de déterminer.
L'un des premiers éléments dont il faut vérifier l'impact est la séquence de cours donnée.

2.1. La séquence de cours

A l'Université de Namur, en 2014, la manière de reporter un résultat avec la précision adéquate est présentée en définissant l'erreur absolue et l'erreur relative, comme illustré sur la figure 40 extraite du syllabus de travaux pratiques. Il est à noter que les définitions données ne sont pas celles des erreurs absolues et relatives mais des incertitudes. Comme déjà souligné par Guare (1991), il n'est pas rare de confondre ces deux notions. Il est bien entendu que cette confusion des deux termes se poursuit dans tout le syllabus.[8]

1. Définitions

L'erreur *absolue* est l'imprécision avec laquelle une grandeur est déterminée. Si Δa est l'erreur absolue sur a, on écrit le résultat a, de la mesure :

$$a \pm \Delta a$$

L'erreur *relative* est le quotient de l'erreur absolue par la valeur de cette grandeur. L'erreur relative sur a vaut :

$$\frac{\Delta a}{a}$$

ou

$$100\,\frac{\Delta a}{a}\ \%$$

Figure 40 : Définitions des « erreurs » absolue et relative (Librairie des Sciences de l'Université de Namur, 2011)

Par la suite, l'« erreur » absolue du résultat d'additions et/ou de soustractions est présentée comme la somme des « erreurs » absolues de chacun des termes du calcul et l'« erreur » relative du résultat de multiplications et/ou de divisions comme la somme des « erreurs » relatives de chacun des facteurs. La notion de chiffre significatif est abordée

[8] Le raisonnement du syllabus a été conservé dans la suite du texte pour des raisons de cohérence

comme étant les chiffres certains et un chiffre incertain, ce dernier étant estimé sur base de la précision des instruments de mesure. Le propos est illustré par des exemples. La règle à appliquer lors d'addition et de soustraction de mesures est présentée, illustrée et suivie d'exercices. Il en est de même pour la règle à employer lors de multiplications et de divisions. Pour cette dernière, un paragraphe explique comment compter le nombre de chiffres significatifs d'une valeur (Figure 41).

Lors d'un produit ou d'un rapport entre des mesures, c'est la donnée ayant le MOINS de chiffres significatifs (la moins précise des mesures) qui l'emporte.
Le NOMBRE DE CHIFFRES SIGNIFICATIFS est le nombre de chiffres de la donnée, à l'EXCLUSION des zéros de GAUCHE, et y compris les zéros de DROITE.
6.0231 m : 5 chiffres
0.006023100 km : 7 chiffres
6023 : 4 chiffres
6023.000 : 7 chiffres
6023 10^3 : 4 chiffres

Figure 41 : Paragraphe reprenant la manière de compter les chiffres significatifs

En plus des explications dans le syllabus de travaux pratiques, les étudiants peuvent participer à une présentation réalisée en début d'année académique et durant laquelle sont abordés et illustrés à l'aide d'exemples simples et décontextualisés les sujets suivants :

- les pièces de verrerie de laboratoire et leur précision ;
- la règle à employer lors d'additions et de soustractions ;
- le nombre de chiffres significatifs ;
- la règle à employer lors de multiplications et de divisions.

Lors de la première séance de laboratoire, la plupart des encadrants reprennent brièvement les règles en les illustrant par des exemples concrets d'opérations que les étudiants devront effectuer au cours de la séance proprement dite. Lors de la rédaction de leurs rapports, ils doivent donc faire attention à reporter les résultats de tous leurs calculs en tenant compte des règles mentionnées. Une partie de l'évaluation du rapport porte d'ailleurs sur leur application correcte.

2.2. Impact de la séquence de cours : Etude préliminaire

En septembre 2014, une enquête sous forme de questionnaire a été faite auprès d'étudiants inscrits en deuxième année d'études universitaires en sciences chimiques (14 étudiants) et pharmaceutiques (63 étudiants) de l'Université de Namur sur leurs

acquis de l'année antérieure lors des activités expérimentales. Les questions portent sur la préparation de la séance de travaux pratiques, leurs acquis conceptuels et procéduraux, la rédaction des rapports et la sécurité en laboratoire. Une appréciation leur a aussi été demandée. Les réponses données par les étudiants sont reprises en annexe 1. L'objectif de ce questionnaire en début de thèse est de se faire une idée générale de l'impact des séances de laboratoire sur les acquis déclarés des étudiants.

Quand il leur est demandé de choisir les apprentissages faits lors des séances de laboratoire, plus de 50 % des étudiants inscrits en sciences pharmaceutiques et plus de 30 % des étudiants inscrits en sciences chimiques ne mentionnent pas l'utilisation correcte des chiffres significatifs qui doit permettre d'écrire un résultat avec la précision adéquate (Figure 42).

Les labos t'ont permis de :

X	Acquérir un savoir technique (emploi de la verrerie, technique du titrage, …)
X	Mieux comprendre certains concepts ou parties de matière théoriques (si tu coches cette case, entoure les concepts ou parties théoriques en question : gaz parfait – quantification de la matière – pH – courbe de titrage – rédox – dismutation – calorimétrie – cycle de Hess – cinétique chimique – solubilité)
X	Mieux comprendre le fonctionnement de certaines techniques (Si tu coches cette case, entoure les techniques en question : dilution – titrage – titrage en retour – titrage indirect)
	Utiliser correctement les chiffres significatifs
X	Apprendre à rédiger des rapports de laboratoire
	Autre :

Figure 42 : Réponse d'un étudiant inscrit en sciences pharmaceutiques lors de l'étude préliminaire (2014-2015)

Certains de ces étudiants soulignent d'ailleurs leur manque de compréhension de cette notion quand il leur est demandé quels sont les points à améliorer :

« *Problème avec les chiffres significatifs toute l'année* »

« *Les chiffres significatifs, on perd beaucoup de points à cause de cela et la plupart n'ont toujours pas compris comment faire.* »

Ainsi, malgré l'itération de l'application des règles permettant de transcrire un résultat avec la précision adéquate au travers de différentes séances de laboratoire, les étudiants éprouvent encore des difficultés, en début de deuxième année d'études dans un domaine scientifique, à le faire.

Pour identifier les difficultés rencontrées et la nature des erreurs commises, des productions étudiantes ont été analysées.

2.3. Analyse de productions étudiantes

Déterminer les difficultés des étudiants lors de la retranscription de résultats avec une précision adéquate permet de les cibler lors de la conception de l'outil. De manière à le faire le plus efficacement possible, il est nécessaire de comprendre la façon de penser et de réfléchir des étudiants lorsqu'ils se retrouvent confrontés à une opération. La première étape de cette étude est d'inventorier, au travers de productions étudiantes (Annexe 2), les erreurs commises et les difficultés possibles.

Le tableau 22 reprend les pourcentages d'étudiants transcrivant le résultat des différentes opérations présentées dans le tableau 8 présent dans la partie traitant de la méthodologie en commettant une ou plusieurs erreurs dans l'application des règles permettant de reporter une valeur avec la précision adéquate dans le premier rapport de laboratoire.

Ensemble des opérations 84 %				
Addition 54 %	Soustraction 23 %	Multiplication 13 %	Division 38 %	Multiplication & division 36 %

Tableau 22 : Pourcentages d'étudiants écrivant les valeurs en commettant une ou plusieurs erreurs dans l'application des règles liées à la précision des résultats lors de la rédaction du premier rapport (2016-2017)

Dans l'ensemble, à peu près 15 % des étudiants ne commettent pas d'erreur sur l'ensemble des opérations lorsqu'ils doivent reporter un résultat avec la précision adéquate. Cela confirme le fait que cette matière est une difficulté pour la plupart des étudiants.

Une majorité d'étudiants se trompent lorsqu'il s'agit de reporter le résultat d'une addition. Par contre, très peu d'étudiants se trompent lors du report du résultat d'une multiplication. Pour mieux cerner les difficultés éprouvées par les étudiants lors de l'utilisation des règles, une analyse plus poussée de chacune des opérations a été effectuée.

2.3.1. L'addition

Les valeurs du calcul ont une précision respectivement au dixième et au centième. Le résultat doit donc, si la règle est respectée, compter une décimale et donc être précis au dixième. Le tableau 23 reprend les erreurs commises par les étudiants dans une opération d'addition : $\mathrm{T}(°\mathrm{C}) + 273{,}15 = \mathrm{T}(\mathrm{K})$. La seconde valeur est considérée comme

expérimentale alors qu'il s'agit d'une valeur fixée par convention. Elle n'a donc, normalement, pas de précision, tout comme n'importe quelle valeur qui ne soit pas issue d'une mesure expérimentale. Cependant, lors de la présentation des règles, nous la traitons artificiellement comme une valeur expérimentale.

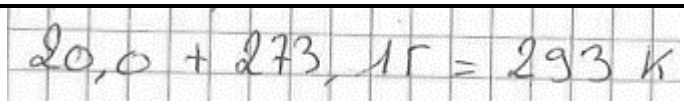
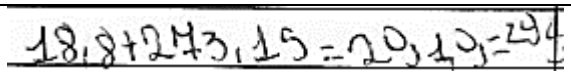
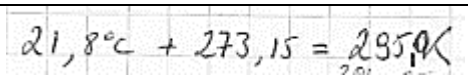
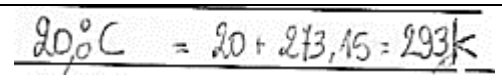
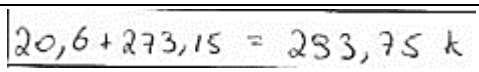
	Copies d'étudiants (2016-2017) ***Description***
1	 La mesure est précise au dixième et compte 3 chiffres significatifs. Le résultat repris par l'étudiant est précis à l'unité et compte le même nombre de chiffres significatifs que la mesure
2	 L'étudiant reporte d'abord un résultat précis au dixième avant de l'arrondir à 3 chiffres significatifs.
3	 De nouveau, l'étudiant reporte un résultat avec 3 chiffres significatifs. Cependant, la valeur à reporter est 295,0 K. Il n'a pas transcrit le zéro donnant la précision au dixième
4	 La valeur de la mesure prise par l'étudiant ne reflète pas la précision de l'instrument de mesure. L'étudiant a omis de reporter un zéro au dixième
5	 Le résultat comporte autant de décimales que le facteur permettant de transformer la température en kelvin

Tableau 23 : Erreurs commises par les étudiants dans une opération d'addition lors de la rédaction des rapports du premier TP (2016-2017)

Sur base de ces exemples d'erreurs, il est possible d'émettre quelques hypothèses pour expliquer les erreurs commises. Dans les deux premiers exemples, les étudiants ont probablement utilisé la règle à appliquer lors des opérations de multiplication et division. Ils ont gardé le même nombre de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le moins. Le résultat présente 3 chiffres significatifs, tout comme la température. Nous ne

pensons pas que l'étudiant ayant écrit le deuxième exemple ait omis de rajouter un zéro en position des dixièmes car le résultat transcrit avant arrondi était déjà précis au dixième.
Dans le cas du troisième exemple, deux hypothèses peuvent expliquer l'erreur : soit l'étudiant a utilisé, comme les précédents, la règle à employer lors des opérations de multiplication et division, soit il n'a pas considéré que le chiffre « 0 » à droite du dernier chiffre non nul était significatif.
L'explication de l'erreur commise au quatrième exemple concerne le sens donné par les étudiants au chiffre « 0 ». Dans cet exemple, l'étudiant n'a pas considéré le zéro à droite de la virgule comme significatif.
Le cinquième exemple montre le cas d'un étudiant qui a probablement reporté, dans son rapport, le résultat affiché par la calculatrice.
En plus de ces erreurs sur la précision, les étudiants commettent parfois des erreurs d'arrondi, comme dans les exemples de la figure 43.

Figure 43 : Erreur d'arrondi commises par des étudiants dans une opération d'addition lors de la rédaction du rapport du premier TP (Productions d'étudiants - 2016-2017)

Dans le premier exemple de la figure supra, la valeur à reporter aurait dû être 293,6. L'étudiant commet à la fois une erreur sur la précision et sur l'arrondi.
Dans le second exemple, aucune erreur n'est commise du point de vue de la précision du résultat. Toutefois, la valeur que l'étudiant aurait dû reporter est 293,8 K. Il a arrondi la valeur en-dessous. La valeur affichée par la calculatrice étant 293,75, la réponse mise par l'étudiant n'est pas due à un apprentissage antérieur. Normalement, en secondaire, les étudiants ont vu l'arrondi arithmétique qui implique d'arrondir au-dessus lorsque le chiffre à arrondir est suivi du chiffre « 5 ».

2.3.2. La soustraction

Le tableau 24 (page ci-après) reprend les erreurs commises par les étudiants dans une opération de soustraction : $\mathrm{P_{atm}} - \mathrm{P_{eau}} - \mathrm{P_{sat}} = \mathrm{P_{H_2}}$. Les valeurs du calcul ont une précision respectivement à l'unité, au dixième et au millième. Le résultat doit donc, si la règle est respectée, ne compter aucune décimale et donc être précis à l'unité. Parfois, l'étudiant reporte une valeur de la pression de la colonne d'eau précise au centième plutôt qu'au dixième. Cela provient d'erreurs commises dans les calculs précédents. Il n'en sera pas tenu compte dans l'analyse des résultats du tableau 24.

	Copies d'étudiants (2016-2017) ***Description***
1	752 − 17,535 − 6,6 = 7,3.10² Torr Le résultat reporté par l'étudiant est précis à la dizaine. Il comporte 2 chiffres significatifs, tout comme la dernière valeur du calcul
2	752 − 7,9 − 17,974 = 726,1 Torr L'étudiant a reporté le résultat avec une précision au dixième, comme la deuxième valeur du calcul
3	PH2 = 753 − 3,16 − 17,974 = 731,86 Torr Le résultat présente une précision au centième comme la deuxième valeur du calcul. Il comporte aussi 5 chiffres significatifs comme la dernière valeur du calcul
4	760 Torr − 19,59 Torr − 3,08 Torr = 737,33 Torr. Tout comme l'étudiant précédent, le résultat reporté est précis au centième et comporte 5 chiffres significatifs. La différence réside dans la deuxième valeur. L'étudiant a transformé la valeur de la tension de vapeur saturante en eau pour qu'elle ne soit plus précise au millième mais au centième (P_{sat} = 19,587 Torr). Elle présente ainsi la même précision que la valeur de la pression de la colonne d'eau.
5	753 − 17,535 − 8,01 = 727,455 Torr Le résultat a une précision au millième. Il présente le même nombre de décimales que la tension de vapeur saturante en eau

Tableau 24 : Erreurs commises par les étudiants dans une opération de soustraction lors de la rédaction des rapports du premier TP (2016-2017)

Les hypothèses sur les raisonnements des étudiants engendrant les erreurs sont peu ou prou les mêmes que lors de l'opération d'addition.

Dans le premier exemple, l'étudiant a utilisé la règle associée aux opérations de multiplication et division. Le résultat reporté comporte autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul en comportant le moins c'est-à-dire, dans ce cas-ci, deux.

Le deuxième exemple révèle un mauvais emploi de la règle à utiliser pour les opérations d'addition et de soustraction. La valeur de la pression atmosphérique n'ayant pas de décimale, l'étudiant a considéré que la valeur comportant le minimum de décimales était celle de la pression de la colonne d'eau. Il a donc reporté le résultat avec une seule décimale. Dans cet exemple apparaît l'ambiguïté existante sur le terme « décimale » présentée au paragraphe 2.3 du chapitre 2.
Le troisième exemple peut s'expliquer de la même manière que l'exemple précédent. Il est aussi possible que l'étudiant compte le nombre de chiffres significatifs et reporte le résultat avec un maximum de chiffres. Il fait alors le contraire de ce que préconise la règle à employer lors des opérations de multiplication et de division. Ainsi, il emploierait la mauvaise règle de manière inadéquate.
Le quatrième exemple est assez intéressant car l'étudiant a transformé une valeur du calcul pour qu'elle présente la même précision qu'une autre. Il est donc possible que, dans ce cas, l'étudiant ait pensé que le résultat devait avoir la même précision que la valeur la moins précise mais sans tenir compte de la valeur précise à l'unité.
Dans le cinquième exemple, l'étudiant a reporté la valeur affichée par la calculatrice.

2.3.3. La multiplication

Le tableau 25[9] (page 143) reprend les erreurs commises par les étudiants dans une opération de multiplication : $\mathrm{L_{ruban}} \times \mu = \mathrm{m}$. Les valeurs du calcul ont un nombre de chiffres significatifs respectivement de 3 et 5. Le résultat doit donc, si la règle est respectée, compter 3 chiffres significatifs.
Les hypothèses présentées ci-après portent sur les raisonnements d'étudiants engendrant ces erreurs. Le résultat du calcul doit normalement être reporté avec trois chiffres significatifs. L'étudiant ayant écrit le premier exemple dans son rapport a probablement considéré le « 0 » comme chiffre significatif, alors qu'il ne l'est pas, pour obtenir un résultat à trois chiffres significatifs. Il était conscient du nombre de chiffres significatifs que le résultat final devait comporter mais il n'a pas perçu la signification des « 0 » à gauche du premier chiffre non nul.
Toujours concernant la signification du chiffre « 0 », il arrive, au contraire, que des étudiants ne considèrent pas certains zéros comme significatifs alors qu'ils le sont. C'est le cas dans le quatrième exemple. L'étudiant a retiré un zéro à la masse linéique et a omis d'écrire le zéro en position des dixièmes à la valeur de la longueur du ruban. Cet étudiant

[9] Les étudiants avaient à leur disposition des morceaux de magnésium provenant de rouleaux différents, ce qui explique les différentes valeurs de masse linéique

commet une autre erreur. Pour reporter le résultat, il a considéré qu’il fallait écrire un maximum de chiffres significatifs. Ainsi, normalement, s’il utilise la règle de façon adéquate, il écrit le résultat avec 2 chiffres significatifs. Dans ce cas-ci, il a transcrit la valeur avec 4 chiffres, ce qui correspond au nombre de chiffres significatifs de la valeur en comportant le plus.

Cette erreur a aussi été commise dans le cinquième exemple. L’étudiant a reporté le résultat avec 5 chiffres significatifs. C’est le même nombre de chiffres significatifs que la masse linéique c’est-à-dire la valeur qui en comporte le plus.

Dans le deuxième exemple, deux hypothèses peuvent être émises. Soit l’étudiant retranscrit le résultat du calcul affiché sur l’écran de sa calculatrice, soit il a utilisé la règle à employer lors d’opérations d’addition et de soustraction. La règle stipule que le résultat a la même précision que la valeur la moins précise. Dans cet exemple, la longueur du ruban est précise au dixième et la masse linéique au millième. Le résultat a été reporté avec une précision au dixième c’est-à-dire avec la même précision que la valeur la moins précise.

L’étudiant ayant écrit le troisième exemple a utilisé la règle associée aux opérations d’addition et de soustraction mais après avoir transformé la masse linéique pour qu’elle présente la même précision que la longueur du ruban. Il s’est arrangé pour que toutes les valeurs du calcul présentent la même précision que la valeur ayant la précision la plus faible.

Dans le sixième exemple, l’étudiant n’a pas reporté la valeur affichée par la calculatrice comme on pourrait le croire. En effet, le résultat indiqué par la calculatrice comporte un chiffre de plus : 273,1113 mg. Il est probable que l’étudiant a utilisé l’opposé de la règle à employer face à des opérations d’addition et de soustraction. Au lieu de transcrire le résultat avec la même précision que la valeur la moins précise du calcul, il l’a écrit avec la précision de la valeur la plus précise.

	Copies d'étudiants (2016-2017) ***Description***
1	0,27 g = 18,787 . 14,2 L'étudiant reporte le résultat avec 2 chiffres significatifs
2	13,6 . 18,500 = 251,6 mg Le résultat compte 4 chiffres significatifs et est précis au dixième, comme la première valeur du calcul
3	18,8 mg → 1 cm 250,0 mg → 13,3 cm La première ligne de cette règle de trois est une traduction de la masse linéique (μ = 18,787 mg.cm^{-1}) à laquelle l'étudiant a retiré 2 décimales. La masse linéique a ainsi la même précision que la longueur mesurée (L = 13,3 cm). Le résultat comporte 4 chiffres significatifs et est précis au dixième
4	18.35 x 12,0 = 220,2 mg c.s. La valeur de la masse linéique a été transformée pour ne comporter que 2 décimales (μ = 18,350 mg.cm^{-1}) et la longueur du ruban ne présente pas la même précision que l'instrument de mesure. Le résultat est quand-même reporté avec 4 chiffres significatifs
5	278,15 mg Le résultat est reporté avec 5 chiffres significatifs
6	273,111 mg = 18,579 . 14,7 Le résultat est reporté avec 6 chiffres significatifs. Il présente aussi une précision au millième tout comme la valeur de la masse linéique (μ = 18,579 mg.cm^{-1})

Tableau 25 : Erreurs commises par les étudiants dans une opération de multiplication lors de la rédaction des rapports du premier TP (2016-2017)

2.3.4. La division

Le tableau 26 (page ci-après) reprend les erreurs commises par les étudiants dans une opération de division : $\frac{h_{eau}}{\rho_{Hg}} = P_{eau}$. Les valeurs du calcul ont un nombre de chiffres significatifs respectivement de 2 et 3. Le résultat doit donc, si la règle est respectée,

comporter 2 chiffres significatifs. Parfois, la valeur de la hauteur de la colonne d'eau comporte 3 chiffres significatifs.

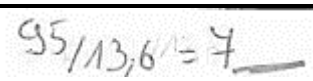
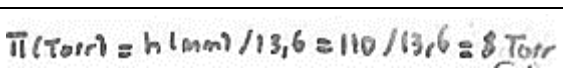
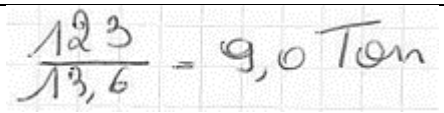
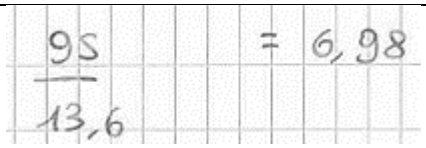
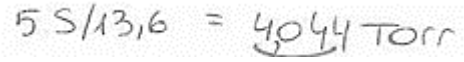
	Copies d'étudiants (2016-2017) ***Description***
1	 La valeur affichée par la calculatrice lorsque ce calcul est effectué est de 6,985294… L'étudiant a arrondi la valeur à l'unité. Cette précision est la même que celle du numérateur
2	 Le résultat est présenté avec une précision à l'unité, tout comme la valeur au numérateur
3	 Le résultat est transcrit avec une précision au dixième, la même précision que la valeur au dénominateur
4	 Le résultat compte 3 chiffres significatifs, comme la valeur présente au dénominateur
5	 Le résultat est reporté avec 4 chiffres significatifs et une précision au millième

Tableau 26 : Erreurs commises par les étudiants dans une opération de division lors de la rédaction des rapports du premier TP (2016-2017)

Les hypothèses émises quant aux raisonnements des étudiants sont peu ou prou les mêmes que lors des exemples illustrant les erreurs commises par les étudiants confrontés à une opération de multiplication :

- considération des « zéros » à droite du dernier chiffre non nul comme étant non significatifs (Exemple 1) ;
- emploi de la règle associée aux opérations d'addition et de soustraction (Exemples 1 et 2) ;

- emploi de l'opposé de la règle associée aux opérations d'addition et de soustraction. Le résultat présente la même précision que la valeur la plus précise (Exemple 3) ;
- emploi de l'opposé de la règle adéquate. Le résultat possède autant de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le plus (Exemple 4).

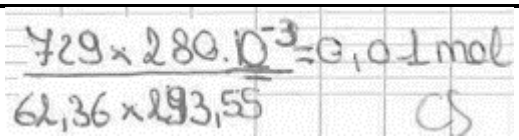
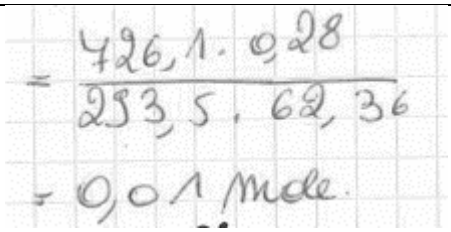
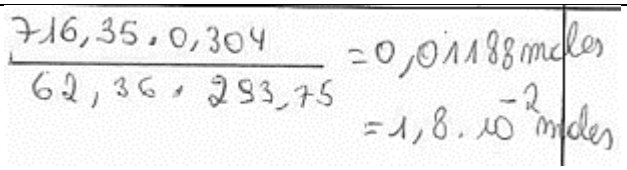
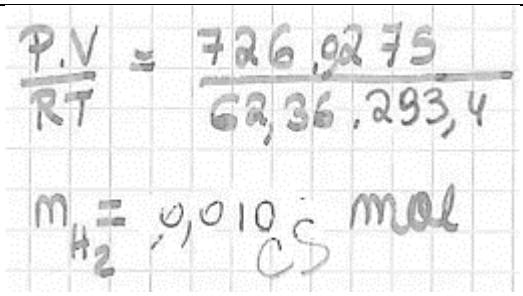
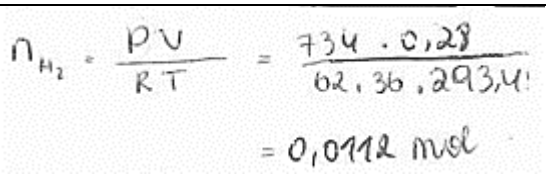
Le cinquième et dernier exemple est complexe. La valeur reportée ne correspond pas à la valeur affichée par la calculatrice (4,0441176…). Elle ne présente ni la même précision, ni le même nombre de chiffres significatifs que n'importe laquelle des valeurs du calcul. Aucune explication n'a pu être trouvée pour expliquer la réponse de l'étudiant. L'arrondi a peut-être été réalisé de manière aléatoire.

2.3.5. Le mélange de multiplication et de division

Le tableau 27 (page ci-après) reprend les erreurs commises par les étudiants dans une opération mêlant multiplication et division : $\frac{P \times V}{R \times T} = n$. Les valeurs au numérateur ont toutes les deux 3 chiffres significatifs. Les valeurs du calcul en dénominateur présentent chacune 4 chiffres significatifs. Le résultat doit donc, si la règle est respectée, comporter 3 chiffres significatifs. Ce calcul reprend des valeurs que les étudiants ont obtenues ou calculées auparavant. Le nombre de chiffres significatifs de chacune des valeurs dépend donc des éventuelles erreurs commises auparavant. Il n'en sera pas tenu compte dans l'analyse des résultats du tableau 27.

De nouveau, la plupart des hypothèses posées pour expliquer les raisonnements des étudiants sont similaires à celles qui sont posées précédemment :

- considération des « zéros » à gauche du premier chiffre non nul comme étant significatifs (Exemples 1, 2 et 6) ;
- considération des « zéros » à droite du dernier chiffre non nul comme n'étant pas significatifs (Exemples 2, 5 et 8) ;
- emploi de l'opposé de la règle associée aux opérations d'addition et de soustraction (Exemples 3 et 4) ;
- emploi de l'opposé de la règle adéquate (Exemples 6, 7 et 8).

Copies d'étudiants (2016-2017)   ***Description***
1    Le résultat devrait normalement comporter 3 chiffres significatifs. Tel que reporté par l'étudiant, il ne présente qu'un seul chiffre significatif précédé de 2 zéros. Il a donc une précision au centième
2    Il n'y a pas de différence avec l'exemple précédent si ce n'est la valeur du volume (V = 280 mL) auquel l'étudiant a retiré un zéro
3    Nonobstant l'erreur qu'a commise l'étudiant lorsqu'il a transformé sa valeur en notation scientifique, le résultat comporte 2 chiffres significatifs et est précise au millième
4    L'étudiant a reporté le résultat avec une précision au millième comme la valeur du volume et 2 chiffres significatifs
5    Le résultat doit être reporté avec 3 chiffres significatifs, ce que l'étudiant a fait. Néanmoins, il a écrit la valeur du volume (V = 280 mL) avec 2 chiffres significatifs

6	$n = \frac{664,762 \cdot 9293}{62,36 \cdot 293\,55} = 0,01064$ mol Le résultat présente 4 chiffres significatifs et une précision au cent-millième. Aucune des valeurs du calcul n'a une telle précision
7	$n_{H_2} = \frac{p_{H_2} V}{RT} = \frac{732 \text{ Torr} \cdot 0,299 \text{ l}}{62,36 \cdot 295,15 \text{ K}} = 0,011891$ mol Le résultat est reporté avec 5 chiffres significatifs, comme la valeur de la température
8	$n_{H_2} = \frac{728,77 \cdot 0,4}{62,36 \cdot 293,15} = 1,5926 \cdot 10^{-2}$ mol Le résultat est reporté avec 5 chiffres significatifs, comme la valeur de la pression du gaz. La valeur du volume a été transformée. L'étudiant lui a retiré les « zéros » à droite du dernier chiffre non nul (V = 0,400 L)

Tableau 27 : Erreurs commises par les étudiants dans une opération mêlant multiplication et division lors de la rédaction des rapports du premier TP (2016-2017)

Pour expliquer la précision de certains résultats reportés par les étudiants, il faut faire appel à plusieurs types d'erreur. C'est le cas des exemples 2, 6 et 8.

Dans le deuxième exemple, la valeur du volume reportée par l'étudiant est de 0,28 L au lieu de 0,280 L. Pour expliquer la précision du résultat écrit par l'étudiant, il faut considérer que les « zéros » à gauche du dernier chiffre non nul sont significatifs. C'est alors cette valeur du volume qui limite le nombre de chiffres significatifs à 3 si on respecte le raisonnement de l'étudiant.

Dans le sixième exemple, l'étudiant reporte un résultat avec 4 chiffres significatifs. La valeur du résultat affiché par la calculatrice est de 0,010640097… Ce n'est donc pas la valeur reprise par la calculatrice. Une logique n'apparaît que si les zéros à gauche du premier chiffre non nul sont comptés comme chiffres significatifs. L'étudiant utiliserait alors la règle de manière inadéquate. Au lieu de garder le même nombre de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le moins, il garde autant de chiffres significatifs que celle qui en comporte le plus dans son calcul, c'est-à-dire 6 (P = 664,762 Torr).

L'étudiant ayant écrit le résultat du huitième exemple a reporté autant de chiffres significatifs que la valeur du calcul qui en comporte le plus, la pression (P = 728,74 Torr). Cet étudiant a employé la règle appropriée de manière inadéquate. De plus, l'étudiant a transformé la valeur du volume de gaz en éliminant les zéros indicatifs de la précision au millilitre (V = 0,400 L), tout comme les étudiants ayant écrit les deuxième et cinquième exemples.

Une autre erreur que peuvent commettre les étudiants ne peut être repérée qu'en observant un autre calcul que ceux cités précédemment. Ce dernier implique de calculer la quantité de matière d'aluminium à partir de celle de dihydrogène. Des coefficients stœchiométriques interviennent : $2\ Al + 6\ HCl\ \rightarrow 2\ AlCl_3 + 3\ H_2$ Ces derniers ne sont pas des valeurs obtenues expérimentalement, ce sont des nombres purs. Ils n'ont donc aucune influence sur la précision du résultat. Cependant, certains étudiants ne font pas la distinction entre les valeurs expérimentales ou qui en sont issues et celles qui ne le sont pas. Ils appliquent donc les règles énoncées sans distinction, comme illustré à la figure 44.

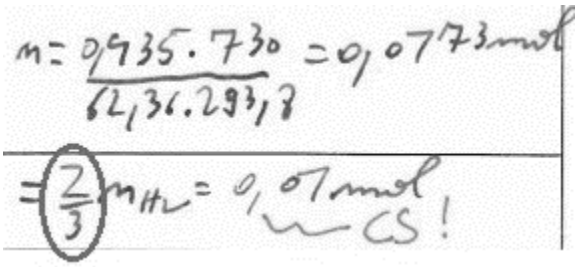


Figure 44 : Impact des nombres purs sur la précision du résultat (Production d'étudiant - 2016-2017)

Dans cet exemple, les chiffres « 2 » et « 3 » ne sont donc pas des valeurs obtenues expérimentalement. L'étudiant considère pourtant qu'il faut en tenir compte lors de l'application des règles permettant de reporter un résultat avec la précision adéquate.

De manière générale, les erreurs commises par les étudiants sont :

- l'emploi de la règle à utiliser lors d'opérations d'addition et de soustraction dans le cas d'opérations de multiplication et de division et vice-versa ;
- la redéfinition des règles par leur opposé ;
- l'élimination de zéros indicatifs de la précision de l'instrument de mesure et donc significatifs ;
- la considération de certains zéros comme significatifs alors qu'ils ne le sont pas ;
- l'influence de nombres purs sur la précision du résultat.

En plus des erreurs sur la précision et sur les arrondis, bien d'autres problèmes apparaissent lors de l'analyse des rapports. Il arrive, par exemple, que les étudiants

omettent de reporter la puissance de dix lors de la transformation d'une valeur en notation scientifique. Ainsi, dans le premier exemple de la figure 45, l'étudiant aurait dû écrire $1{,}15.10^{-2}$ mol pour que les deux valeurs reportées comme résultat soient équivalentes. De même, dans le second exemple de cette figure, le résultat aurait dû être reporté de la manière suivante : $9{,}87.10^{-3}$ mol.

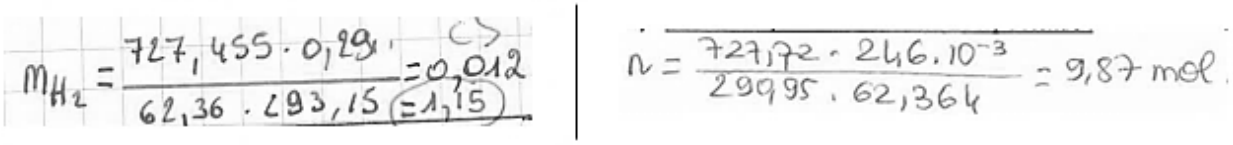


Figure 45 : Exemples d'oubli de la notation scientifique dans le résultat d'une division (Production d'étudiants – 2016-2017)

La figure 46 montre une opération effectuée par un étudiant n'ayant pas pensé à reporter le volume de gaz en litre (V =0,233 L ou 233.10^{-3} L) et non en millilitres. Il y a alors un problème au niveau de la cohérence des unités.

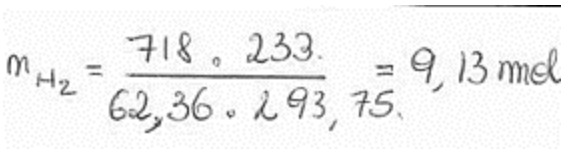


Figure 46 : Erreur commise par un étudiant sur la cohérence des unités (2016-2017)

Il arrive aussi que des étudiants convertissent certaines valeurs de manière erronée. Ainsi, l'étudiant ayant reporté le résultat de la figure 47 a calculé la masse de magnésium $m = 14{,}1\ (cm)\ .\ 18{,}787\ (mg.cm^{-1}) = 264{,}8\ mg$ et l'a convertie en grammes en déplaçant la virgule d'un rang vers la gauche.

Figure 47 : Conversion d'une masse donnée en milligrammes en grammes (Production d'étudiant – 2016-2017)

2.4. *Test proposé aux étudiants*

Cette étude des rapports des étudiants a servi de première approche pour poser des hypothèses sur les raisonnements des étudiants lorsqu'ils reportent des résultats expérimentaux de manière inadéquate. Les hypothèses posées doivent être vérifiées.

Le tableau 28 (page ci-après) reprend les pourcentages d'étudiants transcrivant le résultat des différentes opérations présentées dans le tableau 8 en commettant une ou plusieurs erreurs dans l'application des règles permettant de reporter une valeur avec la précision adéquate lors du test. Les copies des étudiants se trouvent en annexe 4 et sont numérotées.

Ensemble des opérations 81 %				
Addition 62 %	Soustraction 28 %	Multiplication 32 %	Division 51 %	Multiplication & division 29 %

Tableau 28 : Pourcentages d'étudiants écrivant les valeurs en commettant une ou plusieurs erreurs dans l'application des règles liées à la précision des résultats lors du test (2016-2017)

Sur les cinq opérations envisagées, 81 % des étudiants ont écrit au moins un résultat en ne respectant pas les règles énoncées contre 84 % en début d'année académique lors de l'activité de laboratoire reprenant les mêmes calculs (Tableau 22). Aucune évolution significative de la maîtrise de ces notions n'est donc observée au cours de l'année.

Si, globalement, le pourcentage d'étudiants réalisant au moins une erreur est identique, la comparaison des résultats en prenant les opérations individuelles montre que le pourcentage d'erreur est même en augmentation. Ces augmentations de pourcentages observées peuvent s'expliquer par le choix des valeurs reprises dans le test puisqu'elles ont été réfléchies de manière à identifier les erreurs pouvant être commises.

En plus des tests, les entretiens nous ont permis :

- d'identifier le raisonnement effectivement employé lorsque plusieurs types d'erreurs peuvent expliquer le même résultat ;
- de catégoriser les erreurs commises.

2.5. Détermination des méthodes employées par les étudiants

Pour catégoriser au mieux les erreurs, il est nécessaire de percevoir le raisonnement que les étudiants opèrent lorsqu'ils utilisent les règles pour restituer le résultat d'un calcul avec la précision adéquate. Neuf entretiens d'explicitation ont eu lieu et sont repris en annexe 6.

2.5.1. Catégorie 1 : L'utilisation de la règle inadéquate

Dans cette catégorie d'erreur, les étudiants utilisent la règle à employer lors d'une addition ou soustraction dans le cas d'une multiplication ou division et vice-versa. Cette erreur est commise par 74 % des étudiants.

Ainsi, lors d'une multiplication ou d'une division, l'étudiant compte le nombre de décimales au lieu du nombre de chiffres significatifs et écrit donc le résultat avec le même nombre de décimales que la valeur la moins précise du calcul. Lors d'une addition ou d'une

soustraction, l'étudiant reporte le résultat avec le nombre de chiffres significatifs de la valeur qui en comporte le moins au lieu de le reporter avec la même précision que la valeur la moins précise.

Ainsi, l'étudiant 4, dont le calcul de la masse de magnésium est repris à la figure 48, a considéré que le résultat devait présenter une précision au dixième car la première valeur du calcul, la longueur du ruban de magnésium, est précise au dixième.

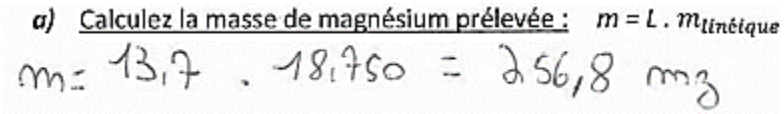


Figure 48 : Multiplication effectuée par l'étudiant 4 (2016-2017)

Lors des entretiens d'explicitation, l'étudiant 4 explique ce qu'il a fait de la manière suivante : « *OK. Ben, donc, ici, j'ai 13,7. Donc, on n'est pas précis au centième près. Mais ici, on est précis au millième près. Donc, la réponse peut pas être précise au millième près. Donc, j'ai pris le dixième de la première unité ici. Je me suis arrêté là, quoi. Et c'est ce que je fais pour tous les trucs, à part des fois où ça me dérange* ».

Ayant commis la même erreur que l'étudiant 4, l'étudiant 7, qui s'est corrigé lors de l'entretien, a employé les termes suivants :

« E : *Alors, pour le premier truc, ici, je pense que j'ai inversé les deux, fin, les deux règles. Donc, heu, ici, c'est une multiplication. Et je pense que j'ai pris comme si c'était une addition ou...*

C : *C'est-à-dire, t'as fait… ?*

E : *J'ai pris les chiffres derrière la virgule, en fait. J'ai regardé et je me suis dit « Il y en a qu'un seul ». Donc, je me suis dit que, dans la réponse, il en faudrait que 1 mais, en fait, c'est pas ça* »

L'étudiant 9 a aussi commis cette erreur durant l'entretien d'explicitation (Figure 49)[10]. Pour cet étudiant, nous avons été confrontés à une situation particulière. Il ajoute un zéro à la valeur de la température en degré Celsius pour obtenir un résultat avec 2 décimales. Ce n'est pas une inversion des règles mais, lors de l'entretien sur l'origine de la présence du chiffre « zéro », il tente de se corriger et commet, à ce moment-là, l'erreur d'inversion.

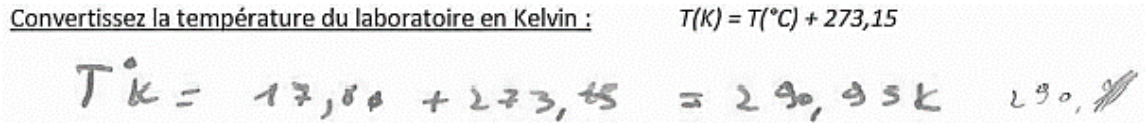


Figure 49 : Addition effectuée par l'étudiant 9 (2016-2017)

[10] Lors des entretiens d'explicitation, certains étudiants ont annoté leur production au crayon

Il retire le chiffre « 0 » ajouté à la valeur de la température ainsi que les 2 décimales de la seconde valeur de manière à ce que toutes les valeurs du calcul présentent le même nombre de chiffres significatifs. Il écrit alors le résultat avec 3 chiffres significatifs. Il explique cela de la manière suivante :

« E : *Ben, celui-ci, c'est une addition donc, normalement, c'est le même principe que celui du dessus. Ben, ici, j'en avais trois. Fin, ici, j'ai corrigé, je pense, parce que c'est plus correct comme ça. Parce que, du coup, ici, j'en ai trois. Ici, j'en ai trois aussi et, à la fin, normalement, on doit en avoir trois aussi... Et je suis plus trop sûr de la règle.* »

Cet étudiant explique qu'il s'est trompé et qu'il ne devait pas rajouter de « 0 » après le nombre 17,8. Il compte ensuite le nombre de chiffres significatifs et dit que le résultat doit comporter 3 chiffres, comme la valeur qui en comporte le moins.

Les entretiens d'explicitation ont révélé qu'il y avait parfois des hésitations voire même des confusions, ce qui peut expliquer la tendance qu'ont certains étudiants à inverser les règles. Par exemple, l'étudiant 6 a employé la règle à utiliser lors du report de résultats d'opérations d'addition et de soustraction dans la multiplication reprise à la figure 50. Il a donc regardé au nombre de décimales de chacune des valeurs et a transcrit le résultat avec le même nombre de décimales que la valeur la moins précise c'est-à-dire la première.

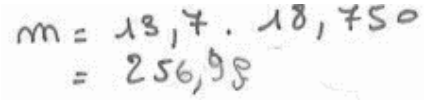


Figure 50 : Multiplication effectuée par l'étudiant 6 (2016-2017)

Lorsqu'il est amené à expliquer comment donner le résultat d'une multiplication, l'étudiant 6 révèle qu'il ne sait pas trop s'il a utilisé la règle adéquate : « *Pour la masse, donc. On a la masse linéique. Donc, c'est une masse par unité de longueur. Donc, on multiplie la masse par la longueur. Ici, j'ai trois chiffres significatifs pour celui-là. J'ai un chiffre après la virgule et j'ai décidé de garder un chiffre après la virgule. C'était le moins précis des deux termes, donc j'ai gardé celui-là mais je me demande si j'aurais pas dû arrondir à 257 pour garder 3 chiffres significatifs plutôt que de garder la même précision* »

Les entretiens d'explicitation révèlent un autre élément : certains étudiants ont tendance à tâtonner, à hésiter face à chacune des opérations, comme déclaré par l'étudiant 1 :

« *Franchement, c'est vraiment un truc, je cale pas trop comment je fais mais, à chaque fois, ça passe. En gros, chaque fois, je me dis, là, je vois qu'il y a que trois chiffres, donc ça sera, fin c'est comme ça que je me dis… 13,7. Là, j'ai trois chiffres. Là, j'en ai plus mais, du coup, je prends le moins précis vu que, par logique, on n'est pas sûr exactement*

… C'est comme ça que je fais, que je tombe sur 256. Maintenant, je ne saurai même pas te dire vraiment comment je fais, je cale plus. Fin, je sens caler le truc mais heu… »

2.5.2. Catégorie 2 : La redéfinition des règles par leur opposé

Dans la seconde catégorie d'erreur, le résultat transmis comporte le même nombre de décimales ou de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le plus. Cette erreur est commise par 47 % des étudiants.

Ce type d'erreur a été commis par l'étudiant 5 dans le cas d'une addition (Figure 51). Il reporte le résultat avec un maximum de précision en se basant sur le nombre de décimales de chacune des valeurs. Les deux valeurs du calcul présentent respectivement une précision au dixième et au centième. Il reporte le résultat avec une précision au centième.

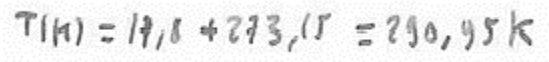


Figure 51 : Addition effectuée par l'étudiant 5 (2016-2017)

Lors des entretiens d'explicitation, l'étudiant explique qu'il a tenu compte de la valeur la plus précise pour déterminer la précision du résultat : « *Ensuite, là, j'ai fait donc heu… comment expliquer ça. J'ai pris, en fait, cette valeur là comme c'est la valeur la plus précise vu qu'il y a deux chiffres après la virgule. C'est pour ça qu'on obtient 290,95 avec deux chiffres* ».

Cette erreur est aussi commise par l'étudiant 8 lorsqu'il effectue des additions et soustractions (Figure 52). Ainsi, dans l'addition, cet étudiant a écrit le résultat avec le même nombre de décimales que le facteur permettant de transformer la température en kelvin car ce dernier comporte plus de décimales que la mesure de la température en degrés Celsius. De la même manière, cet étudiant considère que le résultat de la soustraction doit comporter 3 décimales car la valeur du calcul ayant la plus grande précision en comporte 3.

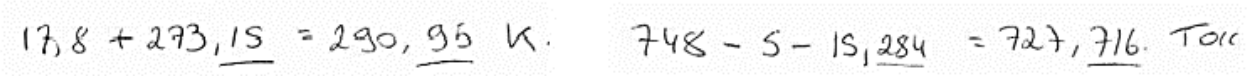


Figure 52 : Addition et soustraction effectuées par l'étudiant 8 (2016-2017)

Lors de l'entretien d'explicitation, l'étudiant 8 parle effectivement de prendre le plus grand nombre de décimales :

« E : *Après, ici, avec les additions, je prends le plus grand nombre après la virgule. Et, ici, après, on avait 5. Et il y a pas de chiffres après donc, c'est juste 5*

C : *Ok ça va*

E : *Ici, soustraction. C'est comme addition, je prends le plus grand nombre après la virgule* »

Aucun des étudiants interviewés n'a commis l'erreur dans le cas d'une multiplication et/ou d'une division. En réalité, cette erreur est commise quelle que soit l'opération envisagée. L'exemple de la multiplication de la figure 53 est tiré du test effectué par l'étudiant 80. Dans cette multiplication, l'étudiant a compté le nombre de chiffres significatifs de chacune des valeurs. Elles comportent respectivement 3 et 5 chiffres significatifs. L'étudiant a donc reporté la valeur du résultat avec 5 chiffres significatifs.

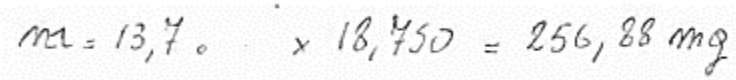


Figure 53 : Multiplication effectuée par l'étudiant 80 (2016-2017)

Il est aussi possible que cette erreur-là ait été commise par l'étudiant 31 lorsqu'il a reporté le résultat de la division (Figure 54). Cet étudiant a compté le nombre de chiffres significatifs du numérateur et du dénominateur qui sont respectivement de 2 et 3. Il a retranscrit le résultat avec 3 chiffres significatifs. Il a donc gardé un maximum de chiffres.

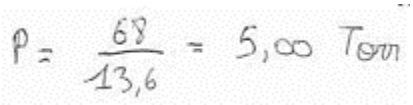


Figure 54 : Division effectuée par l'étudiant 31 (2016-2017)

2.5.3. Catégorie 3 : La modification du sens du chiffre « zéro »

Les étudiants considèrent certains « zéros » comme chiffres significatifs alors qu'ils ne le sont pas et vice-versa. Ainsi, les zéros à gauche du premier chiffre non nul ou certains d'entre eux peuvent être considérés comme significatifs. Cette erreur est commise par 46 % des étudiants.

Prenons le cas de l'étudiant 6. Lors du calcul de la quantité de matière de dihydrogène produit, il écrit le résultat avec 2 chiffres significatifs alors que l'application de la règle aurait donné un résultat à 3 chiffres (Figure 55, page ci-après). Il considère que, en cas de valeur à reporter avec une partie entière nulle, seuls les chiffres à droite de la virgule sont considérés comme significatifs. Cet étudiant considère non pas le premier chiffre non nul pour déterminer les chiffres significatifs mais la virgule, ce qui l'amène à considérer certains zéros comme significatifs alors qu'ils ne le sont pas.

$$n = \frac{P.V}{R.T} = \frac{727,72 \cdot 0,246}{62,364 \cdot 290,6} = 0,0098 \text{ mol}$$

0,010

Figure 55 : Calcul de la quantité de matière effectué par l'étudiant 6 (2016-2017)

Lors de l'entretien d'explicitation, il révèle que sa première intention était de présenter un résultat à 4 chiffres significatifs en comptant les zéros à droite de la virgule. Durant l'entretien, il se rend compte que le résultat doit comporter 3 chiffres significatifs. Il se corrige :

« E : *Ensuite, la quantité de matière de H_2. PV/RT. Ici, j'ai gardé … Ici, les zéros à gauche (de la virgule), ça compte pas donc, j'ai gardé 4 chiffres. C'est les moins précis, encore. Ah non, il y en avait trois, ici* »

C : *Ok, ça va*

E : *Donc, là, je me suis trompée…*

C : *Donc, t'aurais mis… Comme tu dis que tu t'es trompée, t'aurais mis quoi, du coup, à la place ?*

E : *Ben, ici, j'ai trois chiffres significatifs. Donc, j'aurais dû garder … Fin, j'aurais dû faire 00…*

C : *Tu peux l'écrire, si tu veux, si tu as plus facile*

E : *Donc, j'arrondis. Ouais, j'aurai ça (0,010) ... »*

Certains étudiants peuvent aussi considérer les zéros à droite du dernier chiffre non nul comme non significatifs. Ainsi, lorsque l'étudiant 4 transforme la température en kelvin, il effectue le calcul suivant : $T(K) = 17{,}8 + 273{,}15 = 291\ K$. Il explique qu'il ne connait pas le chiffre des centièmes de la première valeur et qu'il doit arrondir au-dessus : « *Ah ouais. Donc, ici, la température du truc. On sait que c'est 17,8. On sait pas exactement le centième donc, vu que c'est 273,15, j'ai arrondi à 291 parce que ça aurait très bien pu être 290,99, quoi* ». S'il respectait ses dires, il aurait arrondi le résultat au dixième. Sa réponse aurait donc dû être 291,0 K. Il ne mentionne pas le dixième ni le zéro. Il semblerait qu'il le considère comme négligeable, accessoire.

L'entretien de l'étudiant 5 est aussi intéressant. Lorsqu'il effectue la multiplication, il utilise correctement la règle à employer, il transcrit le résultat avec le même nombre de chiffres significatifs que la valeur en comportant le moins (Figure 56).

$$m = 13,7 \times 18,750 = 2,57 \times 10^2\ g \qquad P_{colonne} = \frac{h\ (mm)}{d\ (Hg)} = \frac{66\ (mm)}{13,6} = 5\ Torr$$

Figure 56 : Multiplication et division effectuées par l'étudiant 5 (2016-2017)

Il justifie le résultat de la multiplication comme suit :

« E : *Du coup, ça dépend de où est la position du « zéro ». Mais, quand il y a un « zéro » à partir du début, faut pas compter les premiers « zéro ». Et on prend le premier chiffre qu'on trouve autre que « zéro » pour avoir le nombre de chiffres significatifs. Par contre, quand il y a un « zéro » à la fin, on doit le compter dans les chiffres significatifs. Fin, c'est comme ça que j'avais appris, en tout cas. Après, par exemple...*

C : *Et, du coup, pour ce calcul, comment t'as fait ? Du coup, celui-là, tu l'as compté comme chiffres significatifs comme tu viens de l'expliquer ? Le 0, ouais. Et pourquoi tu en as mis trois, là ?*

E : *Parce que j'ai pris la valeur la moins précise, en fait, des deux*

C : *Ok. Au niveau des chiffres, alors ?*

E : *Voilà »*

Par contre, quand il effectue une division impliquant d'ajouter un zéro à droite (Figure 56), il semble ne plus se soucier de respecter la règle. Il écrit ce qui est affiché par la calculatrice :

« *Ensuite, pour la pression. Ici, je sais pas. Je pense que j'ai arrondi. C'est ça ? 68 … Non, c'est pile poil le résultat. C'est 5, quoi* »

Parfois, il arrive aussi que des étudiants ajoutent ou retirent des zéros pour que tous les facteurs présentent le même nombre de chiffres significatifs, comme l'étudiant 2 (Figure 57). Dans l'addition, il a ajouté 2 zéros à la valeur de la température (T = 17,8°C) pour que cette valeur ne compte plus 3 chiffres significatifs mais 5. Dans le même ordre d'idée, il rajoute un zéro à la valeur de la hauteur de la colonne d'eau (h = 68 mm) pour que le numérateur et le dénominateur de la division présentent le même nombre de chiffres. Ce faisant, l'étudiant augmente artificiellement la précision mais ne paraît pas en avoir conscience lors de l'entretien. Il ne parle en effet jamais de précision mais toujours de chiffres significatifs.

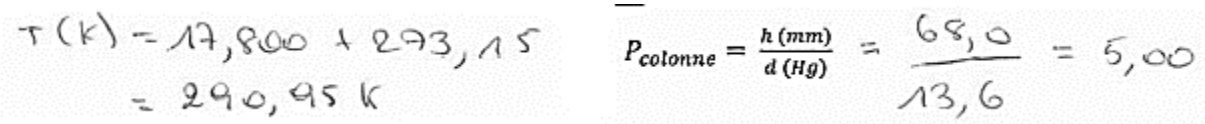


Figure 57 : Addition et division effectuées par l'étudiant 2 (2016-2017)

Il explique cela lors de l'entretien :

« E : *Comme là, c'était cinq chiffres et que là on avait aussi cinq chiffres, ben, j'ai remis directement. En fait, je fais en fonction des chiffres puisqu'on nous a dit qu'on devait toujours avoir les mêmes chiffres, qu'importe où est la virgule*

C : *Ok. Donc, là, pourquoi t'as mis les deux « zéros » ?*

E : *Pour avoir cinq chiffres*

C : *Pour avoir cinq chiffres parce que t'en avais…*

E : *Parce que j'en avais cinq ici. Donc, j'allais pas changer*

C : *Ok. Donc, t'as cinq chiffres, je vois. Ok. Et ici ?*

E : *Pareil, je fais toujours avec le nombre de chiffres parce qu'on nous a dit que les « zéros » avant compte pas mais les « zéros » après compte. Donc, je les rajoute après pour…*

C : *Ok. Donc, du coup, vu qu'ici t'en avais trois, c'est pour ça que t'as remis… à la hauteur*

E : *Ouais. Comme ça, je rajoute un « zéro » derrière et ça (13,6), c'était déjà comme ça. Donc, pour la réponse, c'était 5, donc j'ai mis 5,00* »

L'étudiant 9 commet le même type d'erreur. Il rajoute des « zéros » aux valeurs du calcul mais, lui, explique que c'est pour en augmenter la précision : « *J'ai rajouté le 0 parce que j'en avais vu 4 ici, du coup... C'était pour avoir, pour être plus précis, en fait* ».

2.5.4. Catégorie 4 : Le traitement des nombres purs comme des valeurs expérimentales

Lorsque les étudiants réalisent un calcul, il arrive que les nombres purs, c'est-à-dire des nombres ne provenant pas de mesure, soient considérés comme des valeurs expérimentales présentant une certaine précision. Dans l'exemple illustré à la figure 58, les chiffres 2 et 3 sont les coefficients stœchiométriques d'une équation de réaction. Ils ne proviennent pas d'une mesure. Cependant, l'étudiant en a tenu compte lorsqu'il a déterminé le nombre de chiffres que devait avoir le résultat.

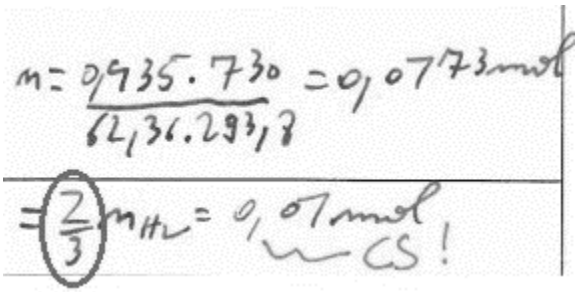


Figure 58 : Impact des nombres purs sur la précision du résultat (Production d'étudiant – 2016-2017)

Cet exemple de la figure 58 provient de rapports d'étudiants et non du test réalisé par la suite. Vu le peu d'étudiants commettant l'erreur présentée supra, nous n'avons pas jugé utile de vérifier notre idée au travers du test. De plus, mettre une équation avec des coefficients stœchiométriques non unitaires dans le test aurait pu être une source de difficulté pour certains étudiants. En effet, comme les formules pour effectuer les calculs

sont fournies dans le test, ces étudiants auraient pu se demander la provenance de ces nombres sans se rendre compte que ces derniers étaient issus de l'équation de réaction. Ils auraient alors pu les considérer comme des mesures par pure ignorance de leur provenance.

2.5.5. Autres types d'erreurs rencontrées

Les difficultés présentées précédemment ne concernent que l'emploi des règles permettant de transcrire la valeur d'un résultat avec une précision adéquate. Cependant, d'autres difficultés sont apparues au travers des différents tests et des entretiens. Parmi celles-ci, nous pouvons souligner :

- l'action d'arrondir correctement ;
- la cohérence des unités ;
- l'utilisation de la notation scientifique.

2.5.5.1. *Les arrondis*

Lors de leurs études secondaires, les étudiants ont appris la méthode de l'arrondi arithmétique. Arrivés aux études supérieures, l'arrondi bancaire leur est présenté. La différence entre les deux se résume à l'arrondi à effectuer lorsque le chiffre à arrondir est suivi d'un 5 uniquement. Il faut alors normalement arrondir au chiffre pair le plus proche. Cela revient à arrondir au-dessus lorsque le chiffre est impair et en-dessous dans le cas contraire. Ainsi, il faut arrondir une fois au-dessus et une fois en-dessous. Certains étudiants traduisent cette règle par la possibilité d'un choix. Ils se disent qu'ils peuvent choisir d'arrondir soit au-dessus, soit en-dessous. La figure 59 reprend la transformation de la température en kelvin ($T(K) = 17{,}8 + 273{,}15$) de l'étudiant 6.

Figure 59 : Addition effectuée par l'étudiant 6 (2016-2017)

Il explique la méthode utilisée pour arrondir les différentes valeurs :

« E : *Alors, après, pour la température, ben, c'est la température en Celsius plus les 230, fin, le zéro absolu. Donc, on a 290,9. Et là, j'ai gardé ,9 parce qu'on a 17,8 degré donc, c'était le moins précis. Donc, fin, ça peut pas être plus précis que celui qui est le moins précis*

C : *Et pour l'arrondi, ici, parce que ça fait … Pourquoi t'as choisi 9 ? Tu vois, quand tu fais le calcul, ben, t'as ,95, en fait*

E : *Ah oui, là. Quand t'as virgule 95, on peut choisir si on arrondit à l'inférieur ou au supérieur et donc là, ben, j'ai choisi inférieur* »

Les étudiants commettent des erreurs d'arrondi lorsque le chiffre à arrondir est suivi d'un 5 mais ce n'est pas le seul cas. En effet, certains étudiants reportent la valeur avec la précision voulue mais le dernier chiffre reporté est celui qui est affiché par la calculatrice même quand l'arrondi devrait normalement se faire vers le haut. Ils n'arrondissent pas correctement. Par exemple, lors du calcul de la masse de magnésium, l'étudiant 1 a reporté une valeur de 256 mg. Or, le calcul de la masse de magnésium ($m = 13{,}7 \,.\, 18{,}750$) donne un résultat affiché à la calculatrice de 256,875. Il respecte la règle à appliquer lors d'une multiplication mais fait une erreur d'arrondi. La valeur reportée devrait être 257 mg. Lors de l'entretien, l'étudiant explique :

« E : *Franchement, c'est vraiment un truc, je cale pas trop comment je fais mais, à chaque fois, ça passe. En gros, chaque fois, je me dis, là, je vois qu'il y a que trois chiffres, donc ça sera, fin c'est comme ça que je me dis… 13,7. Là, j'ai trois chiffres. Là, j'en ai plus mais, du coup, je prends le moins précis vu que, par logique, on n'est pas sûr exactement … C'est comme ça que je fais, que je tombe sur 256. Maintenant, je ne saurai même pas te dire vraiment comment je fais, je cale plus. Fin, je sens caler le truc mais heu…*

C : *Mais au niveau de l'arrondi, comment t'as fait ? Parce qu'en fait, ça tombe pas … Tu peux faire le calcul.*

E : *Ben, j'ai pas fait. Fin, je suis resté à 256, mais je saurais même pas te dire pourquoi. C'est vraiment un truc que je fais à l'arrache et donc…* »

L'étudiant exprime le fait qu'il a omis d'arrondir. Il a appliqué la règle d'écriture du résultat avec une précision adéquate mais n'a pas pensé à arrondir. Ce genre d'oubli peut être dû soit à la hâte que peut avoir l'étudiant en croyant manquer de temps, soit à une surcharge cognitive. En effet, dès la première séance de laboratoire, les étudiants doivent s'approprier du matériel qui leur est, pour la plupart, inconnu, savoir ce qu'ils font tant d'un point de vue théorique que pratique, appliquer la théorie vue au cours ou lors des séances d'exercices dans un cas concret et rédiger un rapport avec toutes les connaissances et compétences que cela implique.

2.5.5.2. *La cohérence des unités*

Lorsque des opérations impliquant des mesures doivent être effectuées, il est primordial que les unités de ces mesures soient cohérentes. Les étudiants, en réalisant des calculs, n'en ont pas toujours conscience. En effet, certains étudiants ne pensent pas à convertir les quelques mesures qui ne seraient pas présentées dans les unités

adéquates, comme illustré à la figure 60. Dans cet exemple, la constante des gaz parfaits est donnée en Torr.L.mol^{-1}.K^{-1}. Le volume de gaz devrait donc être converti en litre. L'étudiant l'a laissé en millilitres telle que présenté dans les données.

$$n = \frac{727,716 \cdot 246}{62,364 \cdot 290,95} = 9,87 \text{ mol.}$$

Figure 60 : Calcul de la quantité de matière effectué par l'étudiant 8 (2016-2017)

Il est probable que l'étudiant n'ait tout simplement pas pensé à convertir les données. De plus, le test ayant clairement été présenté comme une analyse dans le cadre d'une recherche portant sur l'application des règles permettant d'écrire un résultat avec la précision adéquate, il est possible que les étudiants n'aient fait attention qu'aux chiffres significatifs et/ou aux décimales sans penser à la pertinence des résultats.

2.5.5.3. *La notation scientifique*

La dernière difficulté des étudiants repérée au travers de cette étude traite de l'utilisation de la notation scientifique. Il arrive que les étudiants tentent de convertir, de manière erronée, des valeurs dans différentes unités. Certains utilisent, pour ce faire, la notation scientifique. La précision du résultat s'en trouve impactée, comme dans les exemples repris dans la figure 61.

$$n = \frac{15,284 \cdot 246 \cdot 10^{-2}}{62,364} = 0,6028 \text{ mol} \qquad P = P_{labo} - P_c - P_{H_2O} = 768 - 5,0 - 15,284 = 73 \cdot 10^3$$

Figure 61 : Calcul de la quantité de matière et de la pression en dihydrogène effectués respectivement par les étudiants 40 et 58 (2016-2017)

Ainsi, dans le premier exemple de la figure 61, l'étudiant 40 a tenté de convertir le volume donné en millilitres en litre. Il s'est donc trompé d'un facteur 10. Dans le second exemple, l'étudiant 58 a voulu écrire le résultat avec deux chiffres significatifs alors que le résultat à reporter est 728 Torr. Comme l'étudiant 40, il s'est trompé d'un facteur 10.

Parfois, certains étudiants n'omettent pas de convertir les valeurs pour que les unités soient cohérentes mais oublient de reporter la puissance de 10 au niveau du résultat (Figure 62). La valeur que l'étudiant 17 aurait dû reporter est 9,87.10^{-3} mol.

$$n = \frac{727,72 \cdot 246 \cdot 10^{-3}}{290,95 \cdot 62,364} = 9,87 \text{ mol.}$$

Figure 62 : Calcul de la quantité de matière effectué par l'étudiant 17 (2016-2017)

L'exemple de cette figure 62 laisse aussi apparaître un autre élément pouvant poser problème aux étudiants. Lorsqu'ils apprennent à transformer des valeurs en notation scientifique, l'enseignant explique que la partie entière ne doit présenter qu'un seul chiffre. Les autres chiffres sont dans la partie décimale du nombre. Pourtant, à l'université, il n'est pas rare de convertir des valeurs en notation scientifique et de garder plusieurs chiffres dans la partie entière comme lors du report du volume d'une pipette jaugée ($10{,}00.10^{-3}$ L) ou lors de la retranscription de la valeur de la distance Terre-Soleil ($149{,}6.10^{6}$ km). Il s'agit probablement d'une pratique dans les milieux scientifiques visant principalement à garder des puissances de 10 multiples de 3. Cette pratique allant à l'encontre d'un apprentissage réalisé lors des études secondaires, il est possible que cela puisse représenter une difficulté supplémentaire pour les étudiants.

2.5.6. Corrélation des erreurs commises par les étudiants

Jusqu'à présent, l'analyse n'a porté que sur chacune des opérations prises séparément. Il n'a pas été tenu compte de l'ensemble des opérations d'une même copie car l'analyse précédente ne cherchait pas à trouver des corrélations entre les erreurs commises par un même étudiant. Cependant, il y a des informations à retirer de ce type d'étude.

Lors de la catégorisation des erreurs, il est apparu que certains étudiants sont très cohérents. Ils appliquent des raisonnements identiques pour des opérations analogues (addition et soustraction ou multiplication et division). C'est le cas, par exemple, de l'étudiant 8. Lorsque cet étudiant écrit les résultats de multiplications et de divisions, il regarde au nombre de décimales (Figure 63). Ainsi, comme il considère la première valeur de la multiplication et le numérateur de la division comme étant les valeurs possédant le moins de décimales c'est-à-dire respectivement 1 et 0, les résultats de ces deux opérations posséderont également 1 et 0 décimale.

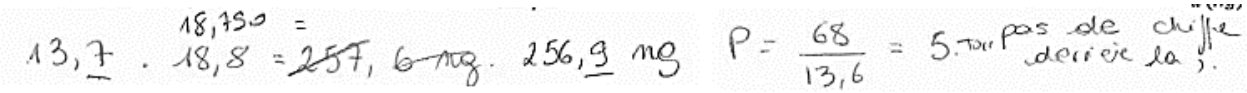


Figure 63 : Multiplication et division effectuées par l'étudiant 8 (2016-2017)

Ainsi, il explique la manière de reporter le résultat d'une multiplication de la manière suivante :

« *Donc, je fais le calcul avec les données qu'on me donne. Et ça, je mets, normal. Et après, je regarde combien il y a de chiffres après la virgule. Et là, on voit qu'il y en a un et là, il y en a trois. Et, avec les fois, on doit prendre le plus petit donc, je mets virgule 9 …* »

Il explique aussi comment il a déterminé la précision du résultat de la division :

« *Après, ici, avec les additions, je prends le plus grand nombre après la virgule. Et, ici, après, on avait 5. Et il y a pas de chiffres après donc, c'est juste 5* »
Lorsqu'il doit reporter le résultat d'additions et de soustractions, l'étudiant 8 reporte le résultat avec un maximum de décimales (Figure 64).

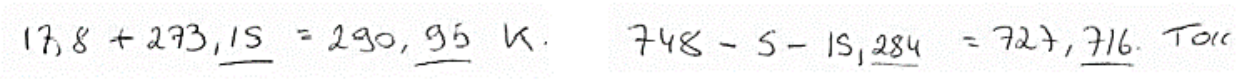


Figure 64 : Addition et soustraction effectuées par l'étudiant 8 (2016-2017)

Il explique la méthode employée lorsqu'il effectue l'addition :
« *Après, ici, avec les additions, je prends le plus grand nombre après la virgule. Et, ici, après, on avait 5. Et il y a pas de chiffres après donc, c'est juste 5* »
Il utilise la même méthode pour les soustractions :
« *Ici, soustraction. C'est comme addition, je prends le plus grand nombre après la virgule* »
Au contraire de l'étudiant 8, il arrive fréquemment que les étudiants utilisent une règle pour la multiplication et une autre pour la division. Il en est de même pour l'addition et la soustraction. C'est ce qu'a fait l'étudiant 5.
Ainsi, lorsqu'il reporte le résultat d'une multiplication, l'étudiant reporte le résultat en utilisant la règle adéquate. Il compte le nombre de chiffres significatifs et reporte le résultat avec le même nombre de chiffres que la valeur qui en comporte le moins. Dans ce cas-ci, comme la première valeur du calcul (la mesure de la longueur du ruban de magnésium) comporte 3 chiffres significatifs et que l'autre valeur en compte 5, il transcrit le résultat avec 3 chiffres significatifs. Il n'utilise pas cette règle lors de la retranscription du résultat de la division où il reporte la valeur affichée par la calculatrice (Figure 65).

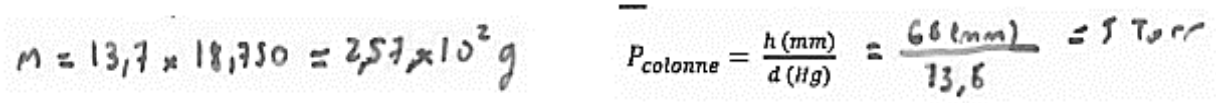


Figure 65 : Multiplication et division effectuées par l'étudiant 5 (2016-2017)

Il explique sa manière de procéder lors de la multiplication :
« E : *Du coup, ça dépend de où est la position du « zéro ». Mais, quand il y a un « zéro » à partir du début, faut pas compter les premiers « zéro ». Et on prend le premier chiffre qu'on trouve autre que « zéro » pour avoir le nombre de chiffres significatifs. Par contre, quand il y a un « zéro » à la fin, on doit le compter dans les chiffres significatifs. Fin, c'est comme ça que j'avais appris, en tout cas. Après, par exemple...*

C : *Et, du coup, pour ce calcul, comment t'as fait ? Du coup, celui-là, tu l'as compté comme chiffres significatifs comme tu viens de l'expliquer ? Le 0, ouais. Et pourquoi tu en as mis trois, là ?*

E : *Parce que j'ai pris la valeur la moins précise, en fait, des deux* »

Il se base donc sur le nombre de chiffres significatifs des différentes valeurs, ce qui doit effectivement être fait. Il n'utilise pas cette même logique pour la division :

« *Ensuite, pour la pression. Ici, je sais pas. Je pense que j'ai arrondi. C'est ça ? 68 … Non, c'est pile poil le résultat. C'est 5, quoi* »

Dans le cas de l'addition et de la soustraction, il n'utilise pas non plus la même méthode (Figure 66). Il reporte le résultat de l'addition avec un maximum de précision en se basant sur le nombre de décimales de chacune des valeurs. Les deux valeurs du calcul présentent respectivement une précision au dixième et au centième. Il reporte le résultat avec une précision au centième. Pour la soustraction, la méthode est plus personnelle. Le résultat ne peut pas avoir de décimales car il a l'habitude que les valeurs de pression soient des nombres entiers.

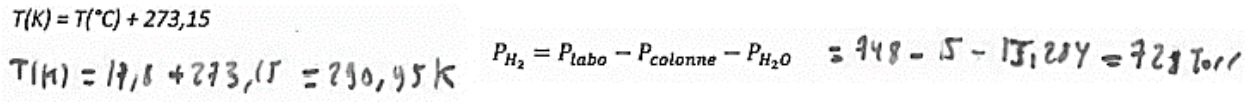


Figure 66 : Addition et soustraction effectuées par l'étudiant 5 (2016-2017)

Voici comment il explique l'obtention du résultat de l'addition :

« *Ensuite, là, j'ai fait donc heu… comment expliquer ça. J'ai pris, en fait, cette valeur là comme c'est la valeur la plus précise vu qu'il y a deux chiffres après la virgule. C'est pour ça qu'on obtient 290,95 avec deux chiffres* »

Il n'a pas de méthode particulière pour reporter le résultat de la soustraction :

« *Du coup, ensuite, pour la pression totale donc heu … J'ai arrondi, en fait, parce que, pour moi, une pression, c'est, fin, c'est pas des chiffres à virgule, quoi. Ensuite, au niveau des moles, ben, du coup, j'ai faux mais…* »

Les étudiants peuvent parfois utiliser des raisonnements qui leur sont propres pour chaque opération effectuée. C'est la raison pour laquelle toutes les opérations sont analysées séparément, sans comparer les opérations de même type.

2.5.7. Etudiant ne commettant pas d'erreur

Les étudiants ne commettent pas tous des erreurs. Quelques-uns ont réalisé un test « parfait ». Tous les résultats sont retranscrits avec la précision adéquate, des arrondis corrects, … Nous avons demandé à l'un de ces étudiants de participer à l'entretien

d'explicitation. Il s'agit de l'étudiant 3 dont les deux premiers calculs du test sont repris à la figure 67.

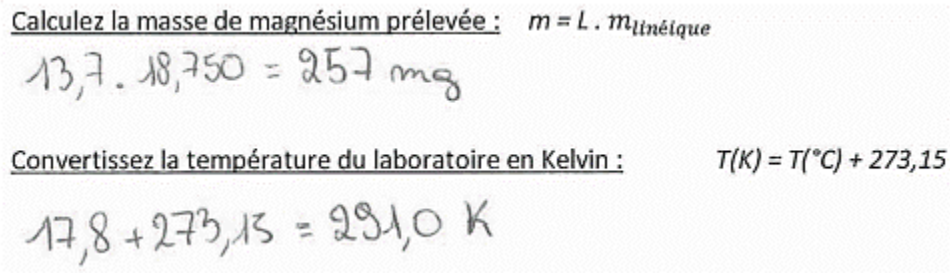


Figure 67 : Multiplication et addition effectuées par l'étudiant 3 (2016-2017)

Lors de l'entretien d'explicitation, l'étudiant explique sa façon de procéder :

« E : *Ben, ici, vu que c'était une multiplication, ben, j'ai pris les deux chiffres et j'ai regardé le nombre de chiffres significatifs. Ici, il y en a 3 et ici, il y en avait 5. Donc, du coup, c'est le plus petit nombre de chiffres significatifs que je prends pour avoir la réponse. Et donc, du coup, là il y en avait trois et j'ai mis trois*

C : *Ok. Très bien*

E : *Après, ici, c'était une addition donc, du coup, c'est par rapport au nombre de décimales, donc ce qui a derrière la virgule. Là, il y en avait une. Là, il y en avait deux. Donc, du coup, la réponse, je l'ai mis avec une seule… un seul chiffre après la virgule*

C : *Et là, pour l'arrondi, pour choisir, t'as fait comment pour décider que t'allais mettre cet arrondi-là ? Si tu veux, tu peux refaire le calcul*

E : *Heu non, c'est parce que c'était 95. Mais vu que c'était un 5 qui était juste derrière le 9, ben, le 5, moi, on m'a appris qu'on arrondissait vers le haut. Donc, du coup, comme c'était un 9, ça devenait un 0 et ça augmentait de 1* »

Il s'avère que l'étudiant emploie toujours la même méthode quelle que soit l'opération. Il commence par identifier le type d'opération impliquée. Il pense ensuite à ce qu'implique la règle à employer au niveau des valeurs du calcul : faut-il regarder le nombre de chiffres significatifs ou le nombre de décimales ? Il détermine alors le nombre de chiffres significatifs ou de décimales de chacune de ces valeurs. Ensuite, il se rappelle de ce que prescrit la règle au niveau du résultat et le transcrit de manière à s'y conformer. La méthode employée reprend donc peu ou prou les étapes suivantes :

1. Détermination du type d'opération impliqué dans le calcul ;
2. Rappel de la règle à employer ;
3. Analyse des différentes valeurs du calcul en termes de chiffres significatifs ou de décimales ;
4. Application de la règle.

3. Synthèse

Les analyses préalables sont réalisées pour poser les bases permettant la conception d'un dispositif d'enseignement dont le sujet est le report de résultats expérimentaux avec une précision adéquate. Les questions de recherche posées portent en fait sur le quoi enseigner et le pourquoi s'y intéresser.

Le quoi enseigner a trait à la légitimité du savoir. Doit-on enseigner des règles issues de transpositions didactiques ? Malgré le manque de sens de ces règles, les contraintes didactiques, pédagogiques et institutionnelles auxquelles nous sommes soumis nous poussent à faire le choix de continuer à les enseigner aux dépens de méthodes plus expertes.

Le pourquoi s'y intéresser revient à se demander à quelles difficultés les étudiants sont confrontés et aux méthodes qu'ils mettent en place pour y faire face. L'analyse de différentes productions d'étudiants et les interviews réalisées ont permis de déterminer des catégories d'erreurs commises par les étudiants :

1) l'utilisation de la règle inadéquate ;
2) la redéfinition des règles par leur opposé ;
3) la modification du sens du chiffre « zéro » ;
4) le traitement des nombres purs comme des valeurs expérimentales.

En plus de ces types d'erreurs, les étudiants ont des difficultés à arrondir correctement les valeurs, à faire attention à la cohérence des unités et à utiliser la notation scientifique. Il faut cependant noter que certains étudiants ne font pas d'erreur. Ils appliquent, pour cela, systématiquement la même méthodologie à chaque opération mathématique.

Il est tenu compte de tous ces constats lors de la conception du dispositif présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 6
Conception et analyse a priori

Ce chapitre présente les choix didactiques et pédagogiques liés à la conception du dispositif d'enseignement.

Lors de l'analyse a priori, des hypothèses sont posées pour expliquer les erreurs commises par les étudiants c'est-à-dire ce que nous pensons être les acquis et/ou préconceptions sous-tendant ces erreurs. C'est à cette occasion que la question de recherche portant sur les raisonnements que les étudiants ont lors du report de leurs résultats expérimentaux avec une précision adéquate est abordée. Bien entendu, ces hypothèses doivent être vérifiées. C'est l'un des objectifs du dispositif créé.

La partie dédiée plus particulièrement à la conception de l'outil expose la manière dont il est construit sur base des choix effectués et des hypothèses posées.

1. Les variables macro-didactiques

1.1. Choix de l'outil

Les progrès informatiques de ces trente dernières années ont engendré certains changements de pratiques dans l'enseignement supérieur. Sont apparus les cours en ligne, les vidéos à visée d'enseignement, les plateformes d'exercices, les jeux didactiques, etc.

Parmi tous ces outils, le plus employé pour partager du contenu est probablement la vidéo. En effet, de nos jours, les programmes permettant d'en monter sont de plus en plus accessibles. Il est aussi de plus en plus facile de les rendre accessibles que ce soit via des sites web comme, par exemple, YouTube ou via des plateformes de cours.

Il existe quatre types de vidéos ayant des visées d'enseignement (Kay, 2012) :

- des cours en vidéos : des films de l'enseignant donnant son cours ;
- des cours améliorés : des vidéos construites suite à des réflexions sur les concepts ou notions visées, les attendus du cours, etc. Par exemple, il peut s'agir d'une présentation Powerpoint avec voix off ;
- du matériel supplémentaire : des vidéos présentant des informations complémentaires au cours comme des résumés, des explications plus poussées de certains sujets, … ;
- des exemples travaillés : des vidéos expliquant comment résoudre des problèmes spécifiques.

De manière générale, les vidéos vont avoir un impact positif, neutre ou négatif sur les comportements des étudiants, sur leurs perceptions de l'enseignement, sur les résultats aux tests de fin d'année, … (Kay, 2014). Ainsi, dépendant du type de vidéos envisagées (Chen & Wu, 2015; Delen, Liew, & Willson, 2014; He, Holton, Farkas, & Warschauer,

2016; McGarr, 2009), de l'utilisation qu'en ont les étudiants (Heilesen, 2010; McGarr, 2009), de l'usage qu'en a le professeur dans le cadre de son enseignement (Harwood & McMahon, 1997), des objectifs visés, de la méthode d'évaluation du cours, …, l'influence des vidéos se fera plus ou moins sentir.

Lorsque les vidéos ne sont en fait qu'un film du cours, elles ne sont utiles qu'aux étudiants n'assistant pas au cours. Elles n'engendrent pas de meilleures performances aux tests de fin d'année à moins que les étudiants ne regardent plusieurs fois les vidéos ou des parties de vidéo (Heilesen, 2010; Wieling & Hofman, 2010).

Dans le cadre de cette recherche, les vidéos produites sont de style « cours améliorés ». Cette option est choisie pour diverses raisons. Tout d'abord, les vidéos, du fait d'avoir le temps de les concevoir, sont réalisées dans le calme, ce qui permet d'augmenter la qualité des productions (Griffin, Mitchell, & Thompson, 2009). En plus de cela, ces vidéos peuvent être réutilisées d'année en année. Il n'est pas nécessaire de recommencer chaque année, contrairement à un cours classique. Ensuite, d'un point de vue pédagogique, ce système offre la possibilité de séquencer la matière en différents thèmes. Dans leur étude, Harwood et McMahon (1997) traitent de l'effet du découpage d'une vidéo par le professeur en classe. Ce découpage permet de vérifier et d'améliorer la compréhension que les étudiants ont du sujet à l'aide de questions posées. Lors de cette recherche, nous avons imaginé construire un cours en ligne composé de plusieurs vidéos séparées par des exercices. Ces derniers auraient la même finalité que les questions de l'enseignant.

1.2. Choix pédagogiques

Le choix de construire un outil sous format vidéo nous a poussé à nous intéresser de plus près aux caractéristiques que doit avoir une vidéo de cours pour qu'elle atteigne efficacement son but. Selon Kay (2014), il existe différents éléments répartis selon quatre critères pour créer des vidéos de type « exemples travaillés ». Nous nous basons sur ces mêmes critères pour construire des vidéos de type « cours améliorés ». Bien entendu, certains des éléments cités par Kay ne sont pas repris car non applicables dans notre cas. Nous avons aussi pris en considération un cinquième critère pour éviter la passivité des étudiants lors de la séquence de cours.

1.2.1. Etablir le contexte

Tout apprentissage poursuit des objectifs. De manière à amener les étudiants à les atteindre, il est nécessaire de clarifier les attendus. La séquence de cours a bien

entendu un objectif global : celui d'enseigner aux étudiants la façon de retranscrire une valeur expérimentale avec la précision adéquate. Cependant, ce n'est pas toujours suffisant. Des sous-objectifs clairs et bien établis peuvent aider les étudiants à organiser leurs connaissances. Chaque vidéo est en général construite autour d'un thème nécessaire à la compréhension du sujet principal. Chacun de ces thèmes présente des objectifs particuliers qu'il est donc préférable de présenter dans chaque vidéo.
Lors de la construction des vidéos, il est aussi important de faire apparaître un contexte, une situation permettant aux étudiants de donner du sens à la matière vue et de faire des liens entre les notions. Dans le cas de cette séquence de cours, le contexte est bien entendu expérimental. Les exemples doivent faire apparaître des instruments de mesures, des opérations à effectuer avec les mesures prises, …

1.2.2. Donner des explications pertinentes

Dans le cadre d'un enseignement, un sujet complexe est généralement fractionné en parties plus abordables. Ces parties doivent être pertinentes pour permettre une compréhension complète du sujet par la suite. Dans le cas de l'enseignement de la façon de reporter un résultat avec la précision adéquate, il faut aborder les concepts ou les notions de mesure et d'incertitude, de précision, de chiffres significatifs, …
Comme mentionné précédemment, toutes ces parties doivent permettre d'atteindre des objectifs particuliers. Pour cela, chacune des parties doit comprendre des explications et des illustrations ou des exemples appropriés. Ces explications doivent permettre aux étudiants de comprendre les connections entre les différentes parties.

1.2.3. Minimiser la charge cognitive

L'exposé d'un nouveau sujet ou d'une nouvelle matière engendre, chez les étudiants, une certaine charge cognitive. Du fait de la limitation de la mémoire de travail, la communication d'un grand nombre d'informations sur une période de temps assez courte peut engendrer une surcharge cognitive. De manière à la minimiser, il est conseillé d'écrire les éléments clés du discours, de ne pas alourdir la présentation avec un grand nombre d'images, d'exemples, de textes, … et de mettre en évidence les éléments les plus importants.
Il est aussi recommandé, toujours pour limiter les risques de surcharge cognitive, d'utiliser une écriture facilement lisible, un minimum de couleurs différentes ou d'animations, … En clair, la forme doit rester sobre tout en restant attrayante.

1.2.4. Engager les étudiants

Il y a peu de chances qu'une vidéo longue dans laquelle la matière serait présentée avec une voix monocorde puisse être suivie jusqu'au bout. Il est donc important, en plus de soigner le visuel, de faire attention à la longueur de la vidéo, au ton de la voix ainsi qu'au rythme de parole. La voix doit être engageante et le rythme adapté à des étudiants novices. Du fait des capacités de concentration limitées dans le temps, les vidéos doivent avoir une durée ne dépassant pas 10 minutes. Également pour éviter des pertes de concentration, il est recommandé d'éviter les distracteurs tels que des images humoristiques, des couleurs changeantes, …

1.2.5. Les activités

De manière à éviter que les étudiants ne fassent que regarder passivement les vidéos, nous avons inclus, dans l'outil, des séances d'exercices et des fiches techniques. Les fiches techniques portent sur des sujets connexes, des sujets n'ayant pas de lien direct avec l'application des règles mais pouvant avoir un impact sur la compréhension du sujet ou l'écriture d'une valeur. Les exercices viennent entrecouper chacune des vidéos. Ils portent sur la matière tirée de la vidéo et, éventuellement, des fiches techniques.

1.3. Utilité du dispositif

Nos activités d'enseignement poursuivent différents objectifs. Le dispositif mis en place a pour but d'initier les étudiants à l'écriture de mesures et de résultats avec une précision adéquate. Certains enseignants peuvent penser qu'il serait utile tant lors des travaux pratiques en laboratoire que lors des séances d'exercices. En effet, son utilité dans le contexte d'une séance de laboratoire est évidente. Mais qu'en est-il lors des séances d'exercices ? Quels objectifs sont-elles censées poursuivre ? Ils sont souvent nombreux. L'intégration et l'application de notions et concepts vus au cours sont parmi les principaux. Les étudiants sont amenés, lors de ces séances, à jongler avec ces notions, concepts, formules, … Ils doivent transférer ce qu'ils ont vus dans un contexte plus concret. Ajouter à cela l'application des règles présentées dans l'outil risquerait de mettre certains étudiants en difficultés. Le dispositif présenté se veut donc être principalement d'application lors d'activités impliquant l'emploi de matériel de laboratoire, d'instruments de mesure ayant une incertitude et nécessitant dès lors de faire attention à la précision des valeurs obtenues.

2. Les variables micro-didactiques

2.1. L'ordre des sujets

L'un des premiers aspects discutés lors de la réflexion sur l'outil est l'ordre des différents points de matière. Habituellement, l'enseignement du report des résultats de calculs avec une précision adéquate débute avec les notions de mesure et d'incertitude absolue et relative, se poursuit avec la définition de ce que sont les chiffres significatifs et la manière de les dénombrer et se termine par la présentation des règles à appliquer. Le tout est souvent accompagné d'exemples. (Hecht, 2000; Skoog et al., 1997; Tro, 2015; Young & Freedman, 2004).

Dans la séquence de cours, nous avons choisi de changer l'ordre des sujets et d'en ajouter deux. Le changement au niveau de l'agencement des sujets concerne la notion de chiffre significatif. Pour rappel, les chiffres significatifs sont les chiffres connus avec certitude et le premier chiffre incertain, ce dernier correspondant à la position décimale du premier chiffre non nul de l'incertitude. En conséquence, tout résultat transcrit avec un nombre adéquat de chiffres significatifs donne une idée de l'ordre de précision de l'instrument de mesure employé ou de la mesure la moins précise qui la compose. Cela permet de pallier à l'absence éventuelle de la valeur de l'incertitude. Cependant, nous avons choisi de présenter la notion de chiffre significatif et la manière de les dénombrer après la règle à appliquer lors d'addition et de soustraction. En effet, celle-ci fait intervenir le nombre de décimales et pas le nombre de chiffres significatifs. Nous espérons ainsi éviter que les étudiants ne comptent toujours le nombre de chiffres significatifs y compris lors d'opérations d'addition et/ou de soustraction. De plus, présenter la notion de chiffre significatif après avoir exposé la règle à employer lors d'additions et/ou de soustractions engendre une séparation nette entre les deux règles. Ceci peut constituer un élément permettant aux étudiants de ne plus intervertir les deux règles.

Les deux vidéos supplémentaires traitent respectivement de la reconnaissance des nombres purs, de leur impact sur la précision d'un résultat et d'une méthode permettant de tenir compte de tous les éléments permettant de reporter un résultat avec la précision adéquate. Cette dernière vidéo fait suite à une constatation issue des interviews réalisées dans le cadre des analyses préalables : les étudiants ne commettant pas d'erreur systématisent leur méthode permettant de reporter les résultats avec une précision adéquate. La figure 68 (page ci-après) présente les changements effectués.

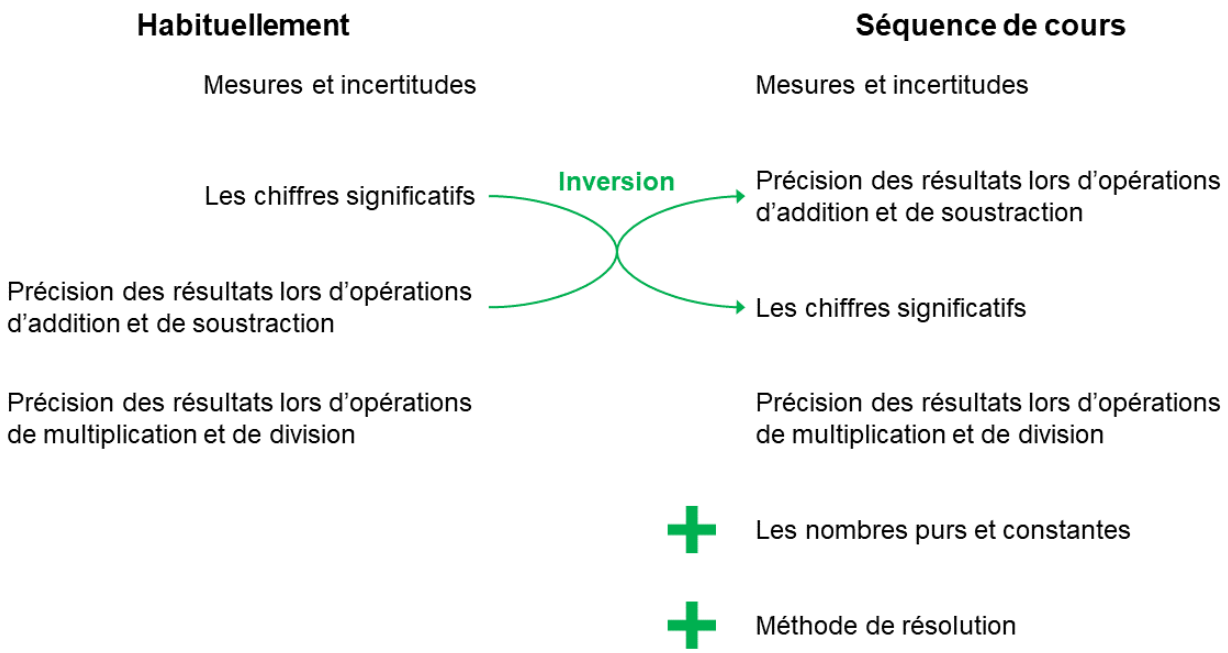


Figure 68 : Ordre de présentation des vidéos de la séquence de cours

Comme mentionné précédemment, des fiches techniques accompagnent les vidéos. Elles sont au nombre de deux et traitent, respectivement, du vocabulaire employé lors d'activités expérimentales et de l'arrondi bancaire. Elles sont intégrées dans la séquence de cours aux moments qui nous semblent les plus propices. Ainsi, la fiche technique traitant du vocabulaire employé lors des activités expérimentales est mise en lien avec la première vidéo et celle qui présente l'arrondi bancaire avec les vidéos exposant les règles à employer lors d'additions et de soustractions ou lors de multiplications et de divisions.

2.2. Choix didactiques

Comme mentionné précédemment, les règles permettant d'écrire des valeurs expérimentales avec la précision adéquate sont issues d'une transposition didactique. Nous avons décidé de continuer à enseigner ces règles au lieu de revenir à une méthode plus experte pour diverses raisons. Les premières sont d'ordre cognitives. Les règles susmentionnées sont plus faciles et moins longues à employer que la méthode experte. Lors de séances de laboratoire, les étudiants débutant des études scientifiques sont confrontés à l'utilisation des différentes pièces de verrerie, l'exécution de techniques particulières, la compréhension des principes sous-tendant ces techniques et des concepts impliqués dans la manipulation, … Ajouter à cela une méthode de détermination de la précision de résultat plus longue et plus complexe ne ferait qu'ajouter à la charge cognitive déjà présente. Et cela sans compter que l'utilisation des règles engendre

visiblement elle aussi des difficultés aux étudiants. En première approche, l'emploi des règles pour déterminer la précision d'un résultat nous paraît donc suffisante, d'autant que ce procédé donne un résultat identique à la méthode experte dans une majorité de cas. Il est toujours possible, si besoin en est, de présenter la méthode experte par la suite. Le besoin ne se fait généralement sentir que dans des domaines particuliers dans lesquels une grande précision est nécessaire. Les théories et concepts liés à ces domaines ne sont habituellement pas abordés lors des premières années d'études. Nous sommes bien entendu conscients que cette approche peut présenter un obstacle à l'apprentissage lorsque l'étudiant devra intégrer une nouvelle démarche plus similaire à la méthode experte.

Les autres raisons sont plutôt d'ordre institutionnelles et organisationnelles. A l'Université de Namur, les séances de laboratoire sont données dans un grand nombre d'étudiants inscrits dans différentes options : biologie, chimie, géologie, géographie, physique, sciences biomédicales, médecine vétérinaire, pharmacie, … Pour la plupart d'entre eux, la connaissance de la méthode experte ne serait pas d'une grande utilité par la suite que ce soit dans le cadre de leurs études ou de leur profession. Il n'est donc pas pertinent de leur enseigner cette méthode plus complexe. De plus, l'emploi de ces règles est dans les usages. Elles sont d'ailleurs citées dans un certain nombre de livres de référence (Hecht, 1999; McQuarrie & Rock, 2007; Skoog et al., 1997; Sternheim & Kane, 1991; Tro, 2015; Young & Geller, 2006).

Malgré tout, l'utilisation des règles n'est pas sans présenter de problème. En effet, elles sont présentées comme des boites noires aux étudiants, ce qui fait qu'ils ne peuvent pas établir de relation entre les règles présentées et les incertitudes de mesure. Il est même possible que les étudiants ne puissent pas définir la notion d'incertitude bien que cette dernière est censée être vue en troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique. Elle est définie comme suit (Pirson, Bordet, Castin, & Snauwaert, 2015, p.105) :

« *L'incertitude absolue sur une mesure est l'estimation de l'écart maximal possible, vers le haut ou vers le bas, entre le résultat de la mesure et la valeur exacte de la grandeur mesurée* »

Notons que seule la notion d'incertitude absolue est reprise dans les programmes de l'enseignement secondaire. Il n'est fait nulle mention de l'incertitude relative ni de l'incertitude qu'il y aurait sur un résultat obtenu suite à la combinaison de plusieurs mesures par des opérations mathématiques. Par la suite, cette notion n'est plus abordée. Il y a fort peu de chance que les étudiants, lorsqu'ils arrivent en première année d'études supérieures, se souviennent de cette notion à moins que l'un de leurs enseignants n'ait mis l'accent dessus. Pour aider les étudiants à comprendre et à s'approprier les règles

permettant de reporter des résultats avec la précision adéquate, il est nécessaire de les relier aux concepts d'incertitude absolue et relative. Lors d'une addition et/ou d'une soustraction, l'incertitude absolue du résultat est la somme (ou racine carrée de la somme quadratique) des incertitudes absolues de chacune des mesures impliquées dans le calcul. La précision de ce résultat est donc généralement égale à la précision de la mesure possédant l'incertitude la plus importante. La figure 69 présente la détermination de l'enthalpie de la réaction entre un acide fort et une base forte en solution. L'incertitude absolue du résultat est obtenue en sommant les incertitudes absolues de chacune des valeurs de cette opération et vaut 0,11 kJ.mol^{-1}. La précision est donc de l'ordre du dixième, tout comme la seconde valeur du calcul. C'est effectivement cette dernière valeur qui a le plus d'impact sur la précision du résultat.

$$\Delta H = -285{,}83 + 230{,}0 = -55{,}8\ kJ.mol^{-1}$$

$$\mathrm{U}(\Delta H_1) = 0{,}01\ kJ.mol^{-1} \qquad \mathrm{U}(\Delta H_2) = 0{,}1\ kJ.mol^{-1}$$

Incertitude absolue plus importante du résultat comportant le moins de décimales

Figure 69 : Illustration du lien entre l'incertitude absolue et la règle enseignée

Lors d'une multiplication et/ou d'une division, l'incertitude relative du résultat est la somme (ou la racine carrée de la somme quadratique) des incertitudes relatives de chacune des mesures. Comme ces incertitudes relatives dépendent elles-mêmes des valeurs expérimentales, plus ces valeurs sont importantes ou comportent de chiffres significatifs, plus leur incertitude relative est petite. Ainsi, la valeur pouvant avoir l'impact le plus important sur l'incertitude du résultat est celle qui a l'incertitude relative la plus importante et donc celle qui comporte le moins de chiffres significatifs. La figure 70 (page ci-après) montre la transformation d'une hauteur de colonne d'eau en pression. L'incertitude relative du résultat est obtenue en sommant les incertitudes relatives de chacune des deux valeurs du calcul et est de 2 %. Cette valeur est essentiellement due à la valeur de l'incertitude relative sur la hauteur de la colonne d'eau. C'est donc cette dernière valeur qui a le plus grand impact sur la précision du résultat.

$$\frac{U(h)}{h} = \frac{1}{68}.100 = 1\ \%$$

$$P = \frac{68}{13{,}6} = 5{,}0\ Torr$$

Incertitude relative plus importante du résultat comportant le moins de chiffres significatifs

$$\frac{U(d)}{d} = \frac{0{,}1}{13{,}6}.100 = 0{,}7\ \%$$

Figure 70 : Illustration du lien entre l'incertitude relative et la règle enseigné

L'incertitude absolue est généralement indiquée sur l'appareil de mesure ou la notice d'utilisation avec un ou plusieurs chiffres. Comme mentionné dans le deuxième chapitre de cette thèse, plusieurs règles d'utilisation de l'incertitude absolue pour reporter le résultat existent. Elles impliquent soit de considérer le premier chiffre non nul de cette incertitude comme indicatif de la précision des mesures, soit d'en garder deux en suivant quelques principes. Dans la suite de ce travail, nous considérons le premier chiffre de la valeur de l'incertitude absolue comme indicatif de la précision de la mesure.

Il arrive aussi, lorsque l'appareil est gradué, qu'aucune indication de l'incertitude ne soit mentionnée. Dans ce cas, il existe deux possibilités : le chercheur considère que l'incertitude absolue vaut la moitié de l'écart entre deux graduations successives ou il estime qu'elle vaut la valeur de l'écart entre ces deux graduations. Dans le cadre d'un enseignement, nous avons choisi cette seconde alternative. Ainsi, lors de la mesure d'une longueur à l'aide d'une règle précise au millimètre, la mesure sera reportée de la manière suivante : $L = 5{,}3\ \pm 0{,}1\ cm$.

L'incertitude relative est, quant à elle, calculée en faisant le rapport entre l'incertitude absolue et la valeur de la mesure réalisée. Si la mesure de la longueur de l'exemple précédent doit être reportée en mentionnant l'incertitude relative, elle sera transcrite de la manière suivante : $L = 5{,}3\ cm\ \pm 2\ \%$.

Lors de calculs, différentes mesures ayant chacune leur incertitude sont impliquées. Normalement, il faut tenir compte de la propagation de ces incertitudes au travers de toutes les opérations effectuées. Là aussi, il existe diverses méthodes :

- Sommer les incertitudes absolues dans le cas des additions et soustractions ou relatives pour les multiplications et divisions ;

- Calculer la racine carrée de la somme quadratique des incertitudes absolues ou relatives, toujours compte tenu de l'opération à effectuer ;
- Sommer les incertitudes multipliées par la dérivée partielle en fonction de chacune des variables du calcul.

En première approche, aucune de ces méthodes n'est présentée. En effet, l'emploi des règles susmentionnées ne nécessitant pas d'y faire appel, il est préférable de ne pas les expliciter pour éviter une surcharge cognitive pour l'étudiant.

Durant la séquence, nous ne traitons que des opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de division. Comment faire pour reporter le résultat d'opérations plus particulières comme, par exemple, des logarithmes, sinus, cosinus, … avec une précision adéquate ? Pour certaines de ces fonctions, il existe aussi des règles telles que celles présentées pour les opérations d'addition ou de soustraction et de multiplication ou de division. Nous avons préféré ne pas les présenter dans la séquence pour éviter d'alourdir le sujet. Un autre élément venant justifier le fait de ne pas intégrer ces règles dans la séquence est l'emploi beaucoup moins courant de ces fonctions par rapport aux opérations susmentionnées. Elles ne sont employées que de manière ponctuelle. Il est alors préférable, de notre point de vue, de construire une fiche reprenant toutes les règles pour ces fonctions. Les étudiants auraient à la consulter si nécessaire.
Une autre solution est bien entendu l'emploi, pour calculer l'incertitude sur le résultat d'un calcul comportant ce type de fonction, de la méthode exacte :

$$\Delta x = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\delta x}{\delta m_i} . \Delta m_i\right)^2}$$

Cette méthode n'étant pas à la portée d'étudiants débutant des études universitaires, les vidéos ne la mentionnent pas.

3. Analyse a priori : hypothèses sur l'origine des difficultés des étudiants

Les erreurs des étudiants ont été catégorisées au chapitre précédent mais leurs causes probables n'ont pas été mentionnées. Des hypothèses quant à ces causes sont présentées ci-après par catégorie.

3.1. Catégorie 1 : L'inversion des règles

Certains des étudiants commettant cette erreur ont exprimé au travers des entretiens d'explicitation qu'ils hésitent, tâtonnent, sont confus lorsqu'ils doivent expliciter la méthode qu'ils ont utilisée. L'hypothèse la plus probable pouvant expliquer ce type d'erreur a déjà été mentionnée à plusieurs reprises : le manque de signification des règles. L'étudiant 1 dit d'ailleurs lors des entretiens qu'il ne sait pas trop ce qu'il fait : « *Franchement, c'est vraiment un truc, je cale pas trop comment je fais mais, à chaque fois, ça passe* »

Il est en effet parfois difficile de comprendre le lien existant entre ces règles et la précision des instruments de mesure, les règles énoncées étant présentées comme des boites noires.

3.2. Catégorie 2 : La redéfinition des règles par leur opposé

Les entretiens d'explicitation ont révélé que les étudiants commettant cette erreur avaient peur de « perdre en précision ». Ils écrivent donc les valeurs avec la plus grande précision possible. Nous pensons que ces étudiants conçoivent les sciences expérimentales comme des sciences exactes, ne souffrant pas les approximations et donc les incertitudes. Il y a donc confusion entre précision et exactitude. Ils ne perçoivent pas que toute mesure réalisée en laboratoire est entachée d'incertitude, donc perd en précision, et que cela n'implique pas forcément de perte d'exactitude. Cette hypothèse est encore renforcée par une recherche effectuée par Evangelinos et al. (2002) sur la façon dont les étudiants inscrits en première année d'études supérieures considèrent les mesures dans le cadre d'activités expérimentales en physique. Ils se basent en partie sur le fait que certains étudiants croient qu'une ou un ensemble de mesures faites avec un instrument précis peut fournir la « vraie valeur » avec précision. Ces derniers appliquent également cette façon de penser aux valeurs calculées. Les étudiants écrivent donc leurs résultats avec un maximum de chiffres significatifs ou de décimales, de peur de perdre en précision. Il est donc nécessaire de sensibiliser les étudiants au fait que les instruments de mesure ont une précision limitée et qu'à une incertitude élevée correspond une faible

précision. Ce dernier lien n'est que rarement présenté lorsqu'il s'agit d'exposer les règles. En effet, si les règles sont présentées comme des boites noires, il n'est pas nécessaire de faire appel au concept d'incertitude pour les appliquer. Rappeler régulièrement cette dépendance entre incertitude et précision devrait fortement limiter cette croyance que développent les étudiants commettant ce type d'erreur : la précision d'un résultat est liée, selon eux, au maximum de chiffres significatifs ou de décimales. Le fait d'exprimer l'idée que le résultat d'un calcul ne peut pas être plus précis que la valeur la moins précise du calcul devrait avoir le même impact.

3.3. Catégorie 3 : Le manque de signification du « zéro »

La mauvaise traduction du chiffre « zéro » en termes de chiffre significatif provient probablement d'une différence de signification du « zéro » en sciences expérimentales et en mathématiques. Cette distinction est d'autant plus claire lorsqu'il s'agit de transcrire un nombre dont l'écriture décimale comporte des « zéros » en notation scientifique. Dans un manuel scolaire destiné à des élèves de 13 - 14 ans (grade 8) (Castiaux, Close, & Janssens, 2008), la notation scientifique est définie comme suit :

« *Un nombre en notation scientifique est un nombre écrit sous la forme d'un produit de deux facteurs :*

- *Le premier facteur est un nombre décimal dont la partie entière ne comprend qu'un seul chiffre (différent de 0) ;*
- *Le deuxième facteur est une puissance de 10*. »

La seule partie de la définition mentionnant le chiffre « zéro » concerne le premier facteur. Le chiffre de la partie entière doit être différent de 0. Cela élimine les « zéros » à gauche du premier chiffre non nul dans le cas d'un nombre décimal. Par contre, il n'est fait mention nulle part des zéros éventuellement présents à droite du dernier chiffre non nul. En général, dans le cadre d'un cours de mathématiques, l'élève doit les éliminer. Ainsi, 56 300 000 s'écrit $5{,}63.10^7$ en notation scientifique. De même, lorsqu'il s'agit de convertir un nombre écrit en notation scientifique en écriture décimale, il ne devra pas hésiter à rajouter des zéros. $2{,}78.10^5$ s'écrira donc 278 000 en écriture décimale. Quelques livres de référence (Barnett, Ziegler, & Byleen, 2015; Swokowski & Cole, 1999) exposent eux aussi ce type d'exemple. Pourtant, les notions de précision et de chiffre significatif sont mentionnées sans entrer dans le détail.

En mathématiques, les « zéros » permettent de situer le rang ou l'ordre de chaque chiffre du nombre (milliers, centaine, dizaine, unité, dixième, …). En sciences expérimentales, les « zéros » à droite du dernier chiffre non nul sont, en plus, indicatifs

de la précision de la mesure. Il est donc nécessaire de les garder lors de la transformation en notation scientifique.

3.4. Catégorie 4 : L'influence des nombres purs

Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette erreur. Lors des différentes opérations mathématiques effectuées, les étudiants ne voient plus, dans les différents termes ou facteurs, que des valeurs dans un calcul. Ainsi, soit ils ne pensent pas à se demander si ces valeurs sont ou pas obtenues expérimentalement, soit ils estiment que toutes les valeurs du calcul vont avoir un impact sur la précision du résultat. Cette seconde possibilité est d'autant plus probable que les règles ne mentionnent pas qu'elles ne sont applicables qu'aux mesures expérimentales. Il est donc nécessaire de préciser que seules les valeurs obtenues expérimentalement peuvent avoir un impact sur la précision du résultat.

3.5. Autres types d'erreur

De manière à créer un outil le plus efficace possible, nous ne pouvons pas ne pas tenir compte des erreurs que certains étudiants commettent lorsqu'ils doivent arrondir une valeur, convertir des données dans d'autres unités ou utiliser la notation scientifique.

L'une des causes principales de ces erreurs est probablement l'oubli. Dans le cas des erreurs d'arrondi, les étudiants peuvent tout simplement avoir recopié les chiffres affichés par la calculatrice. Ils font bien attention à respecter les règles permettant de retranscrire un résultat avec la précision adéquate mais ne pensent pas à arrondir.
En ce qui concerne la conversion des unités et la notation scientifique, les étudiants ne se posent que rarement la question de la pertinence, de la cohérence des valeurs et résultats obtenus lorsqu'ils effectuent des calculs. Ils ne pensent donc pas à faire les conversions qui s'imposent.

Une autre raison pouvant expliquer certaines erreurs sur les arrondis concerne uniquement les arrondis de chiffres suivis du chiffres « 5 » sans autres chiffres derrière. Dans le secondaire, la méthode d'arrondi généralement enseignée est l'arrondi arithmétique qui préconise d'arrondir le chiffre suivi d'un « 5 » au-dessus. En débutant des études scientifiques, une autre méthode d'arrondi leur est présentée : l'arrondi bancaire. Le chiffre suivi d'un « 5 » sans autre chiffre derrière est arrondi au chiffre pair le plus proche. Cela signifie que, lorsque le chiffre précédant le « 5 » est pair, l'arrondi se fait en-dessous et, lorsque le chiffre est impair, au-dessus. Certains étudiants continuent à arrondir systématiquement au-dessus ou choisissent d'arrondir soit au-dessus soit en-dessous de manière aléatoire. Il est donc nécessaire de revenir sur ce sujet avec les

étudiants. Le fait d'arrondir n'a pas d'impact direct sur l'ordre de grandeur de la précision d'un résultat. C'est à intégrer dans l'outil à mettre en place mais plutôt sous forme d'information connexe. La différence entre les deux types d'arrondis concerne les chiffres suivis d'un 5 sans autres chiffres derrière. Cette différence doit être clairement mise en évidence.

Les erreurs lors de la transcription de valeurs en notation scientifique ne sont pas non plus uniquement dues à des oublis. Parfois, il arrive que des étudiants ne sache pas réaliser de transformation en notation scientifique de manière adéquate. Cependant, le fait de se tromper peut avoir un impact plus ou moins important sur la précision du résultat que ce soit lors de la détermination de la précision d'un terme d'une addition ou soustraction ou lors du comptage du nombre de chiffres significatifs des facteurs d'une multiplication ou division. C'est la raison pour laquelle une remarque sur la notation scientifique doit être faite dans les deux cas.

4. Construction d'un outil

L'outil proposé est une séquence de cours en ligne composée de six vidéos entrecoupées d'exercices et de deux fiches techniques.

Chacune des vidéos a une durée de 6 à 10 minutes et sont pratiquement toutes construites selon le même canevas. Les différents sujets sont abordés de manière théorique, illustrés à l'aide d'exemples et accompagnés de remarques sur la cohérence des unités, l'écriture de valeurs en notation scientifique, … quand cela est nécessaire. Le choix des mesures employées pour illustrer nos propos s'est fait sur base des connaissances des étudiants acquises avec certitude. Il s'est donc porté sur des mesures familières, ce qui limite les exemples. De plus, cela permet d'éviter l'ajout de nouvelles notions pouvant engendrer un surplus de charge cognitive.

Ces vidéos peuvent être consultées en cliquant sur les liens présents dans l'annexe 9.

Chaque vidéo est suivie d'une série de 2 à 5 exercices d'application ayant un lien avec ce qui a été présenté. Les questions sont, le plus souvent possible en rapport avec les sciences expérimentales. Il s'agit de questions à réponse courte lorsque la réponse attendue est numérique et de questions à choix multiples ou de vrai ou faux dans le cas contraire. A la fin de chaque exercice, l'étudiant sait si la réponse donnée est correcte. En cas de réponse incorrecte, il a, dans certains cas, l'occasion de recommencer. Ce n'est qu'une fois la série terminée qu'il reçoit un feedback et/ou une explication.

Les fiches techniques reprennent des concepts utilisés en laboratoire mais qui sont connexes au sujet de la séquence : le vocabulaire lié aux activités expérimentales et l'arrondi bancaire.

La séquence de cours, appelée parcours au départ du projet, a été majoritairement co-construite avec une étudiante dans le cadre d'un mémoire dans notre unité de recherche. Comme mentionné dans le chapitre traitant de la méthodologie, le dispositif a ensuite été proposé à des encadrants pour avis avant d'être mis à disposition des étudiants. Les avis des encadrants sont repris en annexe 8 et portent autant sur la forme que sur le fond. Les encadrants sont anonymisés à l'aide de lettres. La version du cours en ligne présentée ci-après fait suite aux transformations réalisées pour tenir compte de leurs remarques.

La figure 71 présente l'ensemble du cours en ligne. Les étoiles jaunes, bleues et oranges représentent respectivement les séances d'exercices, la fiche technique « vocabulaire » et la fiche technique « arrondi ».

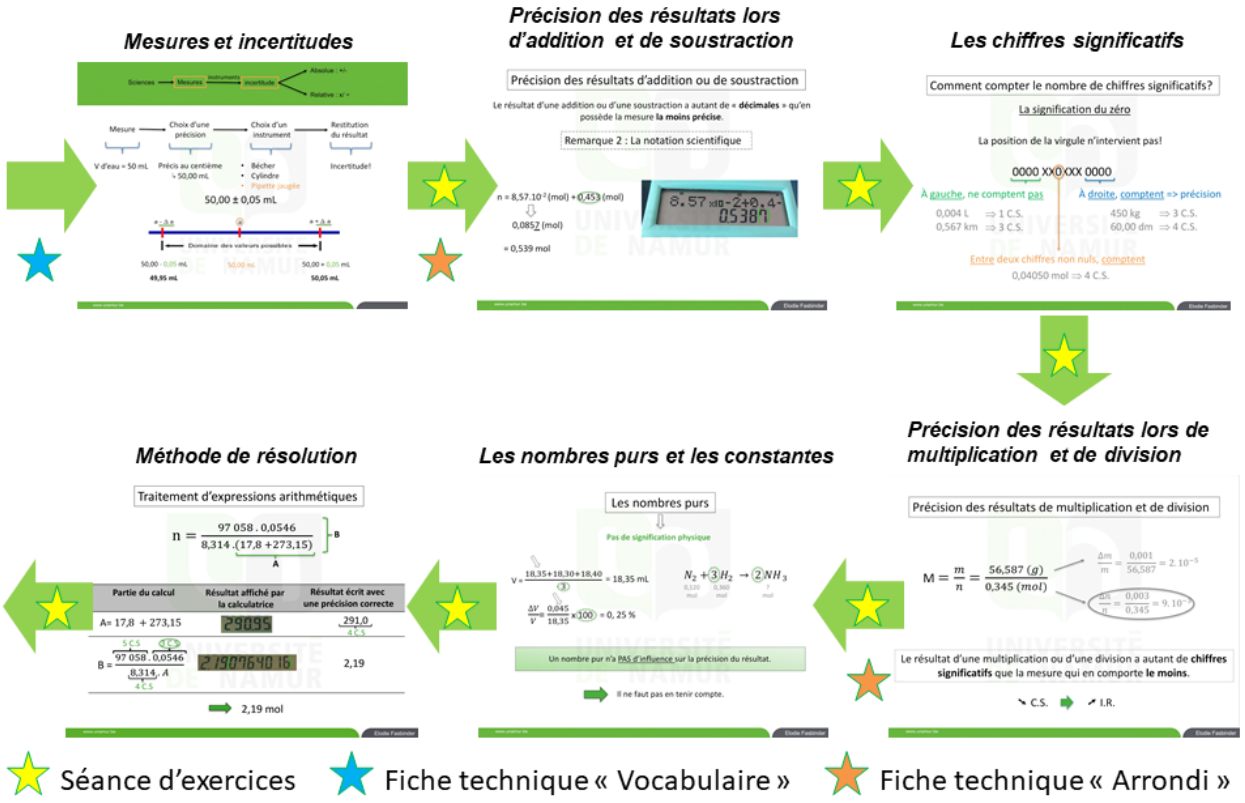


Figure 71 : Séquence de cours

Lors de la conception de ce dispositif, nous avons tenu compte des hypothèses suivantes :

- les règles manquent de sens ;

- le chiffre « zéro » n'a pas la même signification en sciences expérimentales et en mathématiques ;
- les étudiants ont peur de « perdre en précision » ;
- les étudiants ne font pas la distinction entre des valeurs obtenues expérimentalement et celles qui ne le sont pas ;
- une méthode systématique permettant de reporter les résultats avec la précision adéquate est nécessaire.

4.1. Fiche technique 1 : Vocabulaire lié au laboratoire

Lors des séances de laboratoire, les étudiants sont confrontés aux notions d'incertitude et de précision mais aussi d'exactitude et d'erreur. Toutes ces notions engendrent parfois des confusions, la plus connue d'entre elles étant celle qui existe entre incertitude et erreur (Guare, 1991). De plus, la notion de précision possède deux significations (Pacer, 2000). La première de ces significations est synonyme de reproductibilité. Lorsque des mesures sont répétées, le fait qu'elles soient proches implique une grande précision. Le second sens donné au mot précision réfère à la finesse avec laquelle la mesure est faite. Ce sens-là est en lien avec l'incertitude. Plus l'incertitude est élevée, moins la mesure est précise. Afin d'éviter les confusions, nous avons créé une fiche technique définissant les différents termes et explicitant les liens entre eux. Cette fiche technique, présentée à la figure 72 (page ci-après), apparaît juste avant de débuter la première vidéo. Au premier abord, elle se présente sous forme de croix dont les branches comportent les définitions des différents termes rencontrés. Les informations présentes dans les espaces séparant les branches de la croix ne sont pas visibles directement. Les étudiants sont amenés à cliquer sur des liens au centre de ces espaces pour faire apparaître les différentes illustrations. Par exemple, s'ils souhaitent connaître le lien entre la seconde définition de la précision et l'incertitude, ils cliquent sur le lien dans la case supérieure droite pour voir apparaître l'exemple de la latte. S'ils veulent connaître le lien entre la première définition de la précision et l'exactitude, ils cliquent sur le lien de la case supérieure gauche pour que l'exemple des cibles s'affiche. Ils procèdent de la même manière pour les deux dernières cases.

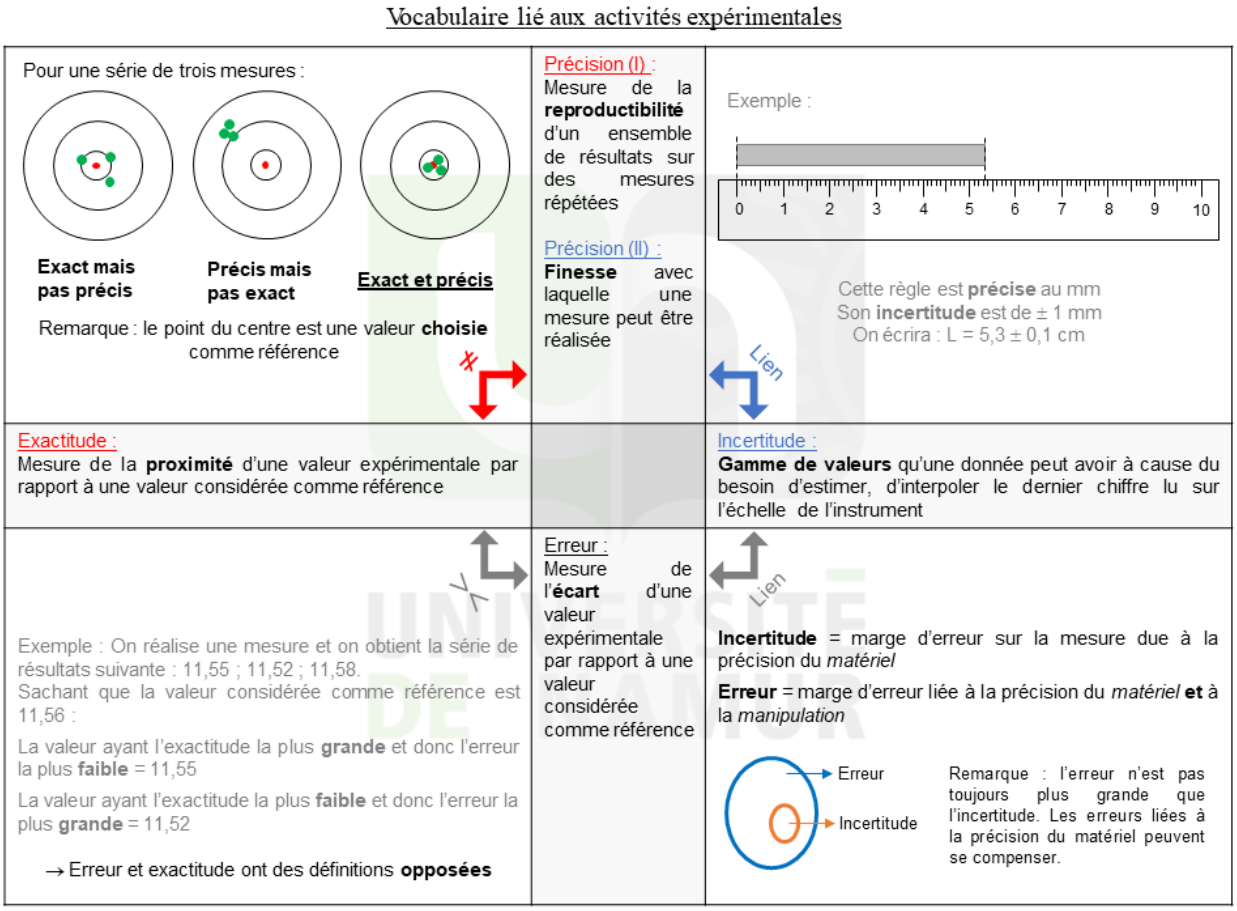


Figure 72 : Fiche technique sur le vocabulaire lié aux activités expérimentales

Actuellement, le vocabulaire lié à toutes les notions de métrologie a été adapté. Le mot français « précision » n'apparaît plus. Ce qui était appelé « précision » dans le sens de « reproductibilité » est devenu la « fidélité ». Le second sens donné au mot « précision », celui qui est lié à l'incertitude de mesure, n'existe plus, tout au moins dans le langage expert. Normalement, il ne faudrait plus parler de précision mais uniquement d'incertitude. A l'Université de Namur, le choix a été fait de continuer à présenter le lien entre incertitude et précision puisqu'aucune recommandation du Bureau International des Poids et Mesures (Joint Committee For Guides In Metrology, 2012) ne semble le critiquer.

La fiche technique a donc été révisée mais pas uniquement pour tenir compte des changements susmentionnés. D'autres transformations ont été réalisées telles que l'ajout de la notion de justesse, la distinction entre les erreurs de mesure et de justesse ou la correction de la définition de l'exactitude. Dans la fiche technique précédente, l'exactitude fait référence à une valeur expérimentale sans préciser si cette dernière était issue d'une mesure unique ou d'une moyenne de mesures. Actuellement, la définition recommandée par le Bureau International des Poids et Mesures mentionne l'exactitude comme étant un écart entre une seule mesure et une valeur de référence. Il souligne que cet écart ne

s’exprime pas numériquement mais est une donnée purement qualitative. C’est l’erreur de mesure qui permet de quantifier l’exactitude puisqu’il s’agit de la valeur de l’écart susmentionné. L’« exactitude » liée à la moyenne d’une série de mesures est, quant à elle, appelée la justesse. Parallèlement à l’exactitude, la justesse n’est pas une donnée quantitative. C’est l’erreur de justesse qui l’est. L’erreur de justesse est donc à la justesse ce que l’erreur de mesure est à l’exactitude.
En corollaire de tout cela, obtenir une moyenne de valeurs juste et des valeurs fidèles a pour conséquence d’avoir des mesures qui soient toutes exactes. La justesse sans la fidélité ou vice-versa implique de facto qu’au moins une des valeurs mesurées ne soit pas exacte.

Au vu de ces changements, il n’a plus été possible de garder la structure en croix adoptée dans la fiche précédente. La nouvelle fiche technique est présentée à la figure 73 (page ci-après). Par contre, les informations reprises dans les cadres de couleur sont, tout comme dans la fiche précédente, invisibles au départ. Les étudiants doivent cliquer sur des liens pour faire apparaître les illustrations. Par la suite, ils ont accès à la fiche dans son entièreté sous format .pdf.

Vocabulaire lié aux activités expérimentales

Justesse : Etroitesse de l'accord entre ***la moyenne*** d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence

Fidélité : Etroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées répétées du même objet ou d'objets similaires dans des conditions fixées

Dans l'exemple suivant, le point central est une valeur ***choisie*** comme référence et les points verts représentent des mesures

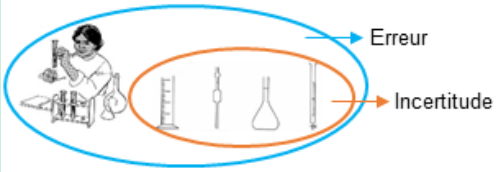
Exactitude : Etroitesse de l'accord entre ***une*** grandeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande

Exemple : On réalise une mesure et on obtient la série de résultats suivante : 11,55 ; 11,52 ; 11,58.
Sachant que la valeur considérée comme référence est 11,56 :

La valeur ayant l'exactitude la plus **grande** et donc l'erreur la plus **faible** = 11,55
La valeur ayant l'exactitude la plus **faible** et donc l'erreur la plus **grande** = 11,52

→ L'erreur exprime quantitativement le **défaut** d'exactitude d'une mesure

Erreur de mesure : Différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et la valeur de référence



Remarque : l'erreur n'est pas toujours plus grande que l'incertitude. Les erreurs peuvent se compenser.

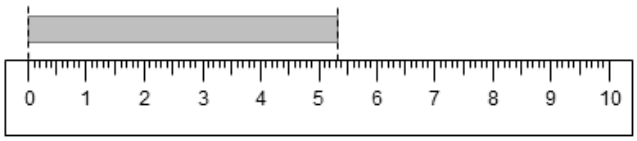
Incertitude : Gamme de valeurs qu'une mesure peut avoir due aux paramètres de l'instrument

Incertitude = écart dû à la précision du *matériel*

Erreur = écart dû à la précision du *matériel* **et** à la *manipulation*

Précision : Rang, position décimale du premier chiffre non nul de l'incertitude

Exemple :



Cette règle est **précise** au mm
Son **incertitude** est de ± 1 mm
On écrira : L = 5,3 ± 0,1 cm

Figure 73 : Nouvelle fiche technique sur le vocabulaire lié aux activités expérimentales

4.2. Vidéo 1 : Mesures et incertitudes

L'objectif principal de cette séquence de cours étant d'enseigner aux étudiants comment transcrire une valeur expérimentale avec la précision adéquate, il nous paraissait nécessaire de la faire débuter avec les notions de mesure et d'incertitude[11]. En effet, l'incertitude des différents instruments de mesure a un impact sur la précision des résultats. Mesure et/ou incertitude sont d'ailleurs deux éléments revenant dans la majorité des vidéos suivantes.

La vocation particulière de cette vidéo est de poser les premiers jalons permettant de lutter contre la croyance qu'ont certains étudiants qu'il faut mettre le plus de chiffres ou de décimales possibles pour éviter de perdre en précision (Deuxième catégorie d'erreurs commises par les étudiants).

Elle débute en établissant la notion d'incertitude de mesure et se poursuit en illustrant le propos lors du choix d'un instrument en fonction de la précision souhaitée (Figure 74).

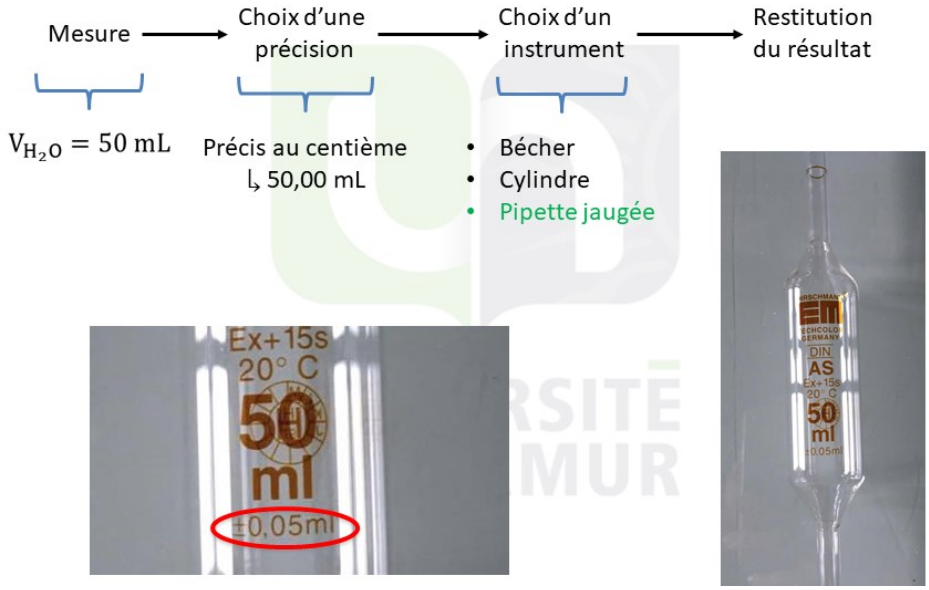


Figure 74 : Choix d'une pièce de verrerie en fonction de la précision voulue

Le lien entre incertitude et précision n'est pas clairement exprimé dans la vidéo mais l'est au niveau de la fiche technique « vocabulaire ». L'exemple donné est celui du prélèvement d'un certain volume d'eau avec une précision au centième : 50,00 mL. Nous proposons différentes pièces de verrerie : un bécher, un cylindre et une pipette jaugée. Nous expliquons et montrons que les deux premières pièces ne sont pas adaptées pour prélever le volume demandé. Le bécher présente des graduations tous les 20 ou 25 mL et la notation « volume approximatif ». Il ne sert pas à mesurer des volumes si ce n'est

[11] Dans cette séquence de cours, l'incertitude absolue d'une mesure m est notée Δm et pas U(m) par soucis de cohérence avec les informations données dans les autres cours

de manière inexacte et imprécise. Le cylindre, quant à lui, a une incertitude de ± 0,5 mL indiquant que sa précision est de l'ordre du dixième. La précision n'est pas suffisante pour prélever 50,00 mL d'eau. La dernière pièce, la pipette jaugée, présente une incertitude de ± 0,05 mL. Sa précision est de l'ordre du centième de mL, ce qui la rend adéquate au prélèvement envisagé.

Par la suite, nous abordons la façon des restituer le résultat obtenu. Tous d'abord, nous mentionnons qu'il n'existe pas de valeur vraie, de valeur exacte, que tous les résultats expérimentaux sont entachés d'incertitude. Même les données fournies dans les tables découlent de mesures réalisées dans des conditions bien spécifiques. L'exemple donné est celui de la masse atomique relative. La valeur renseignée, appelée mesurande bien que provenant d'une table, doit par conséquent être accompagnée de son incertitude. Dans cet exemple, nous citons la masse atomique relative comme provenant d'une série de mesures moyennées. En fait, les masses atomiques sont obtenues en faisant la moyenne des masses des différents isotopes de l'élément compte tenu de l'abondance de ces isotopes. Ce n'est donc pas tout-à-fait une moyenne car elle est pondérée. Nous considérons cependant que les étudiants débutant des études dans un domaine scientifique savent, pour la plupart, ce qu'est une masse molaire. Aucun autre exemple suffisamment connu des étudiants ne nous est venu à l'esprit.

Nous poursuivons en reprenant l'exemple de la mesure du volume d'eau avec la pipette jaugée. Le mesurande est égal à 50,00 mL et l'incertitude est de ± 0,05 mL. La restitution du résultat prendra alors la forme suivante : $V_{H_2O} = 50{,}00 \ \pm 0{,}05\ mL$.

Ensuite, nous posons la question de la signification de l'incertitude.[12] L'incertitude est définie comme un intervalle de confiance, la gamme de valeurs dans laquelle se situe la mesure (Figure 75). Nous revenons alors sur l'exemple de la pipette en disant que le prélèvement effectué n'est pas exactement de 50,00 mL du fait de l'incertitude sur la pipette mais que le volume prélevé se situe assurément entre 49,95 et 50,05 mL.

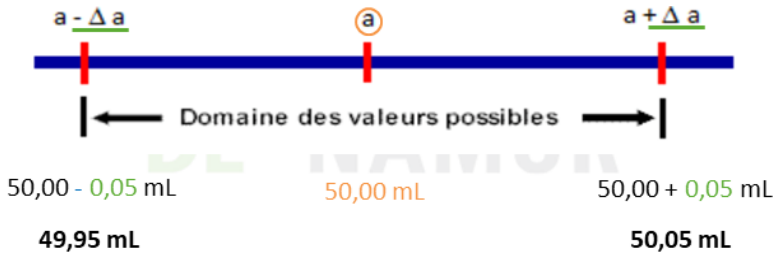


Figure 75 : Signification de l'incertitude d'une mesure

[12] Nous avons fait le choix de ne pas toujours préciser que nous parlons ici d'incertitude absolue, certains des propos tenus étant très généraux et donc valables que nous parlions d'incertitude absolue ou relative.

La vidéo se termine par des illustrations de report de différentes mesures. Trois cas peuvent se présenter :

- des pièces de verrerie ou appareil de mesure dont l'incertitude est notée dessus ;
- des pièces ou appareils gradués sur lesquels aucune mention d'incertitude n'est faite ;
- des appareils électroniques dont l'incertitude est reprise dans la notice d'utilisation.

La première situation est illustrée à l'aide d'une pipette jaugée permettant de prélever un volume de 5 mL avec une incertitude de 0,022 mL. Nous expliquons que la valeur à retranscrire est $5{,}00 \pm 0{,}022\ mL$, le premier chiffre non nul de l'incertitude étant de l'ordre du centième. Cet exemple a été choisi pour montrer comment retranscrire une valeur avec la précision adéquate lorsque la valeur de l'incertitude absolue comporte plus d'un chiffre.
Lorsqu'aucune valeur d'incertitude n'est notée sur l'appareil, certains chercheurs considèrent que l'incertitude est donnée par la moitié de l'écart entre deux graduations successives. En pratique, nous employons souvent l'écart entre ces deux graduations comme incertitude. Ainsi, lors d'une mesure de longueur avec une règle précise au millimètre, les valeurs reportées seront du type 5,6 cm ou 12,5 cm et non 5,65 cm ou 12,50 cm.
Pour ce qui est des appareils électroniques, comme le pHmètre, il est nécessaire d'aller rechercher la valeur de l'incertitude dans la notice d'utilisation.
Quel que soit le cas envisagé, une fois l'incertitude déterminée, la position du dernier chiffre du résultat doit correspondre à la position du premier chiffre non nul de l'incertitude.

La dernière illustration est également une remarque : deux appareils apparemment identiques peuvent avoir des incertitudes différentes. Nous montrons alors deux cylindres gradués tous les millilitres. Le premier ne présente pas de valeur d'incertitude tandis que l'autre a une incertitude de 0,5 mL. Il est expliqué que la lecture de la valeur du volume n'est pas la même. Le cylindre sans mention d'incertitude a une précision à l'unité car la valeur de l'incertitude est considérée comme étant de 1 millilitre. Les valeurs de volume du second cylindre, elles, doivent être reportées avec une précision de l'ordre du dixième. Il est à noter qu'il existe deux façons de déterminer l'incertitude d'instruments de mesure gradués ne la mentionnant pas :

- l'incertitude correspond à l'écart entre deux graduations successives ;
- l'incertitude est la moitié de l'écart entre deux graduations successives.

Comme mentionné au paragraphe 2.2, nous avons choisi d'enseigner la première méthode.

Les exercices proposés à la fin de la vidéo portent à la fois sur le contenu de la vidéo et sur celui de la fiche technique traitant du vocabulaire à employer lors d’activités expérimentales.

Dans l’exercice de la figure 76, les étudiants doivent lire et reporter le volume de liquide écoulé d’une pipette graduée. Ils doivent bien entendu faire attention au ménisque mais aussi à l’incertitude de la pipette qui est de 0,05 mL. La réponse à cet exercice est 0,95 mL.

Figure 76 : Premier exercice lié à la vidéo « Mesures et incertitudes »

Dans le deuxième exercice (Figure 77, page ci-après), les étudiants doivent classer une burette, une pipette graduée et un ballon jaugé par ordre de précision croissante. Ils doivent ainsi faire le lien entre précision et incertitude et classer les pièces de verrerie présentées par ordre d’incertitude décroissante. La pipette graduée est moins précise que le ballon jaugé qui est lui-même moins précis que la burette.

Figure 77 : Deuxième exercice lié à la vidéo « Mesures et incertitudes »

Les deux exercices suivants testent plutôt la compréhension que les étudiants ont eu de la fiche technique « Vocabulaire ».

Par l'exercice de la figure 78 (page ci-après), nous souhaitons vérifier que les étudiants ne confondent pas incertitude et erreur. En effet, ils doivent répondre que c'est faux. C'est l'incertitude absolue sur la mesure qui est de 0,5 mL.

Figure 78 : Troisième exercice lié à la vidéo « Mesures et incertitudes »

Pour ce quatrième et dernier exercice (Figure 79, page ci-après), nous souhaitons tester la compréhension qu’ont les étudiants des notions de justesse et de fidélité. Pour rappel, il y aura une grande fidélité lorsque les valeurs des mesures obtenues sont proches et une grande justesse lorsque la moyenne de ces mesures est proche d’une valeur de référence. Pour répondre à cette question, les étudiants ont, au niveau de chaque case, un menu déroulant avec les mots fidèles et non fidèles ou justes et pas justes. La réponse

à donner est la suivante : Les résultats de l'étudiant A sont non fidèles et justes et les résultats de l'étudiant B sont fidèles et pas justes.

Lors de la réalisation d'un titrage, deux étudiants obtiennent les résultats suivants :

Etudiant A : V_1 = 19,85 mL ; V2 = 20,05 mL ; V3 = 20,10 mL

Etudiant B : V_1 = 20,85 mL ; V2 = 20,80 mL ; V3 = 20,90 mL

La valeur obtenue par les assistants (et donc choisie comme référence) est de 20,00 mL.

Si on compare les résultats des étudiants entre eux et avec la valeur obtenue par les assistants,

les résultats de l'étudiant A sont [ ] et [ ] et

les résultats de l'étudiant B sont [ ] et [ ]

Figure 79 : Quatrième exercice lié à la vidéo « Mesures et incertitudes »

4.3. Fiche technique 2 : Comment arrondir correctement un nombre ?

En plus des erreurs énoncées, certains étudiants ne pensent pas à arrondir adéquatement les valeurs ou ne savent pas comment les arrondir. Comme mentionné précédemment, en sciences expérimentales, la méthode d'arrondi la plus couramment utilisée est l'arrondi « bancaire ». La spécificité du chiffre 5 engendrée par ce type d'arrondi est souvent méconnue des étudiants car ils ont vu la méthode de l'arrondi « arithmétique ». Il est assez improbable que cette particularité seule représente un obstacle à l'apprentissage. Cela est d'autant plus vrai que le nombre de mesures à arrondir se terminant par un « 5 » est assez limité. Cette méthode d'arrondi a été privilégiée pour des raisons d'exactitude. Dans les domaines scientifiques, l'arrondi bancaire est plus employé que l'arrondi arithmétique car, lorsque les mesures sont répétées un grand nombre de fois, les écarts engendrés par l'arrondi de chiffres suivis par un « 5 » sont compensés.

La seconde fiche technique montre donc comment faire un arrondi bancaire et met l'accent sur le cas où le chiffre à arrondir est suivi d'un 5. L'utilisation de cette fiche est

illustrée aux étudiants dans une vidéo muette dans laquelle apparaissent les éléments suivants les uns après les autres :

- la ligne reprenant les chiffres à arrondir ;
- la flèche de gauche et l'exemple associé ;
- la flèche de droite et l'exemple associé ;
- la flèche centrale jusqu'à la question « autres chiffres après ? » ;
- la flèche partant vers le « oui » et l'exemple associé ;
- la flèche partant vers le « Non » et les exemples associés.

La fiche apparaît alors comme un arbre de décision. Ils doivent donc déterminer quel est le chiffre suivant le chiffre à arrondir. Ils retrouvent ensuite celui-ci sur une échelle allant de 0 à 9 et appliquent la règle indiquée par les flèches de la figure 80.

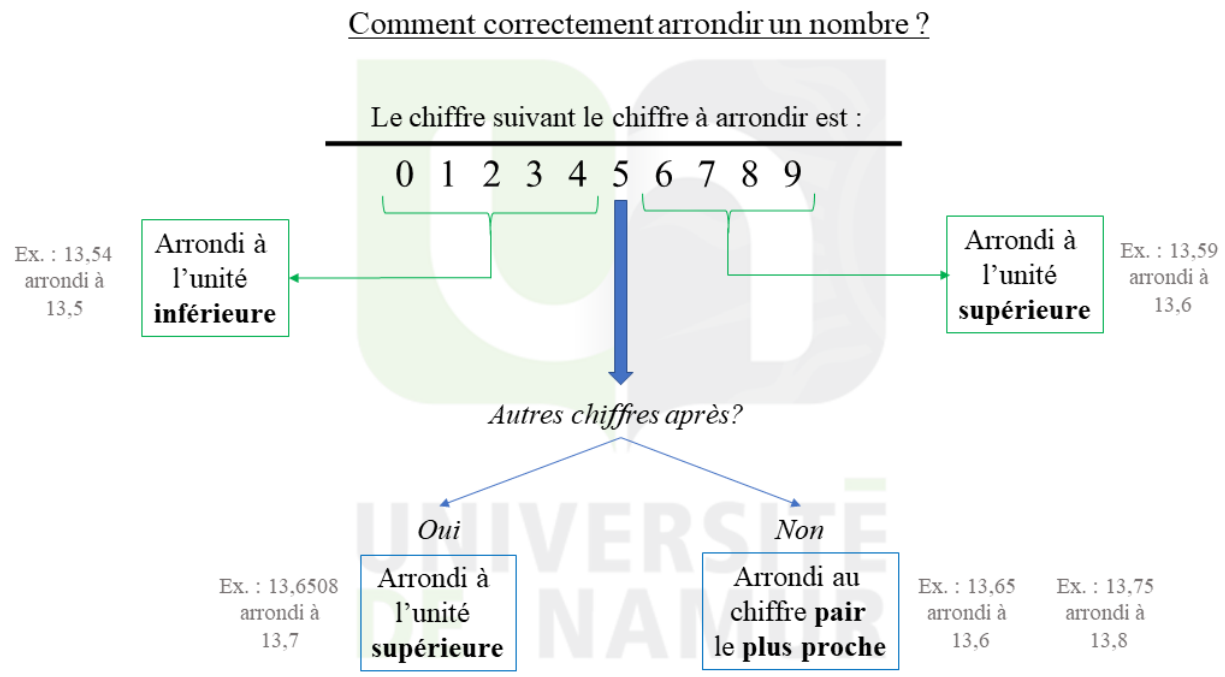


Figure 80 : Fiche technique sur la manière d'arrondir un nombre

Cette fiche est accessible en version pdf.

4.4. Vidéo 2 : Précision des résultats lors d'opérations d'addition et de soustraction

La deuxième vidéo traite de la transcription de valeurs issues d'opérations d'addition et/ou de soustraction. Nous poursuivons deux objectifs liés aux catégories d'erreurs commises par les étudiants :

- donner du sens à la règle (Catégorie 1) ;

- sensibiliser au fait que la précision d'un résultat ne peut pas être supérieure à celle de la mesure la moins précise (Catégorie 2).

Elle commence par une présentation de ce qu'est une quantité dérivée c'est-à-dire une valeur obtenue par combinaison de valeurs expérimentales et, éventuellement, théoriques (tabulées) (Figure 81).

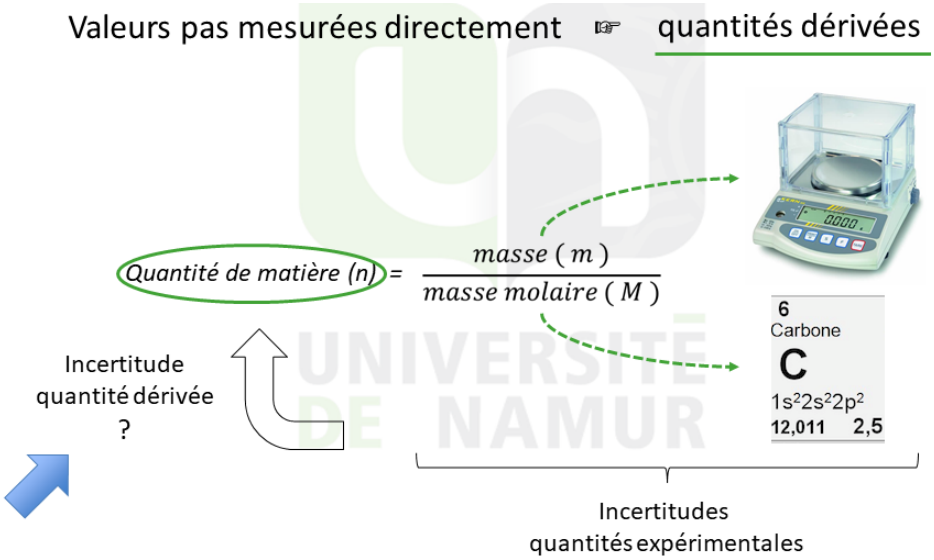


Figure 81 : Importance des incertitudes de mesure pour déterminer la précision d'un résultat

L'exemple pris est celui du calcul d'une quantité de matière à partir d'une masse. La masse est déterminée par pesée avec une balance ayant une précision limitée et la masse molaire est une grandeur tabulée. Le but est de montrer que ce sont les incertitudes des valeurs du calcul qui permettent de déterminer l'incertitude du résultat et que cette incertitude est associée à la précision : plus l'incertitude est importante, plus la précision est petite et vice-versa. Ensuite, nous expliquons qu'il existe deux règles fonction de l'opération à effectuer : une pour les opérations d'addition et de soustraction et une pour les opérations de multiplication et de division.

A ce stade, aucune distinction n'est faite entre les deux types d'incertitude, absolue et relative, car l'idée se veut générale, applicable à toutes les quantités dérivées quelles que soient les opérations dont elles sont issues.

Par la suite, nous mentionnons qu'il y a un lien entre les règles à appliquer qui seront présentées et l'incertitude. Nous parlerons d'incertitude absolue dans le cas des opérations d'addition et de soustraction et d'incertitude relative pour les opérations de multiplication et de division.

Avec la règle à appliquer lors d'opérations d'addition et de soustraction, le résultat doit présenter le même nombre de décimales que la mesure qui en comporte le moins. Nous

avons gardé le terme « décimale » tout en étant conscients des conceptions erronées qu'il pouvait engendrer. En effet, pour rappel, ce terme peut être mal interprété par les étudiants qui peuvent penser qu'il s'agit uniquement des chiffres après la virgule alors qu'il s'agit du rang des différents chiffres en base dix. Nous avons pensé à d'autres possibilités comme d'utiliser le terme « précision » ou « ordre de grandeur » ou encore de faire appel à l'incertitude. Cependant, la séquence de cours ayant pour objectif de présenter aux étudiants la manière de retranscrire des résultats avec la précision adéquate quelle que soit l'opération envisagée, nous ne voulions pas employer le mot « précision » dans l'énoncé de l'une des règles. Les deux autres alternatives ont pour inconvénient d'alourdir la règle.

Cette règle tient compte de l'incertitude absolue des différentes valeurs. Dans l'exemple de la figure 82, le terme présentant l'incertitude absolue la plus importante est le premier. C'est donc lui qui a le plus d'impact sur l'incertitude du résultat et donc sur sa précision. En effet, plus l'incertitude est importante, plus la précision est petite. Or, le résultat d'un calcul ne peut avoir une précision plus importante que la valeur la moins précise. Ainsi, le résultat ne présente qu'une seule décimale, comme le terme le moins précis du calcul.

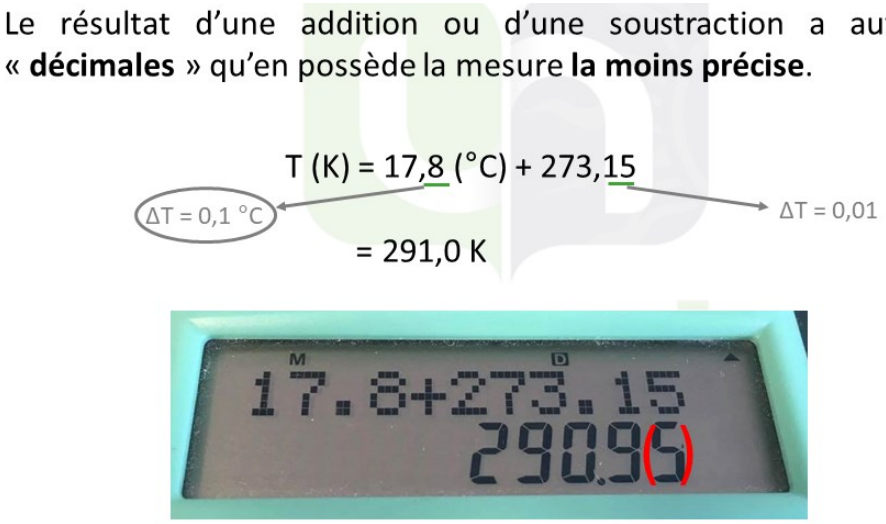


Figure 82 : Lien entre l'incertitude absolue des termes et la règle à appliquer

Dans cet exemple de la figure supra, la règle à utiliser pour reporter le résultat d'une opération d'addition ou de soustraction est illustrée par la transformation d'une température en kelvin :

$$T(K) = T(°C) + 273{,}15$$

Ce faisant, nous considérons artificiellement le facteur de conversion comme une constante expérimentale. En réalité, il s'agit d'une valeur qui, d'expérimentale, est devenue conventionnelle. Elle a été fixée à l'image de la vitesse de la lumière dans le

vide qui vaut exactement 299 792 458 m.s^{-1}. Cet exemple a été choisi pour plusieurs raisons. L'une de ces raisons concerne l'organisation du cours théorique. La conversion de la température en kelvin intervient dans la loi des gaz parfaits, matière généralement vue dans la première partie du cours. Les étudiants connaissent donc cet exemple pour l'avoir déjà rencontré. L'erreur que commettent très souvent les étudiants sur ce calcul en particulier est une autre raison. Ils ont effectivement tendance à écrire le résultat avec une précision au centième. De plus, cette opération engendre un résultat affiché par la calculatrice se terminant par un « 5 » au niveau du centième. Le résultat devant être reporté avec une précision au dixième, il faut faire un arrondi sur un chiffre suivi d'un « 5 » non suivi d'autres chiffres. C'est justement une particularité de l'arrondi bancaire : il faut arrondir au chiffre pair le plus proche. Cet exemple a donc été choisi dans le but de faire référence à cette particularité de l'arrondi bancaire. La fiche technique expliquant cela est bien entendu proposée aux étudiants avant qu'ils ne visionnent la vidéo pour éviter de devoir y exposer cette matière.

Il n'y a pas que l'opération qui soit particulière mais également la mesure de la température renseignée. Comme la valeur calculatrice est 290,95 et la valeur reportée 291,0, les étudiants pourraient avoir l'impression d'un arrondi à l'unité et pas au dixième. Cependant, il est bien expliqué dans la vidéo qu'il faut se baser sur le nombre de décimales de la valeur en comportant le moins. Il est dit que le résultat doit être précis au dixième et pas à l'unité. Enfin, cet exemple a également pour avantage de présenter deux caractéristiques importantes. Il n'implique pas de nombre pur et les valeurs affichent une précision différente.

A chaque exemple donné, la valeur affichée par la calculatrice est montrée. Cela nous permet de rappeler aux étudiants qu'il est nécessaire d'arrondir les résultats. Nous précisons, à cette occasion, qu'il existe une fiche technique expliquant comment arrondir. Le fait de montrer la calculatrice permet également de montrer les chiffres gardés ou éventuellement ajoutés (ex. : $P = \frac{68}{13{,}6} = 5{,}\mathbf{0}\ Torr$) pour retranscrire le résultat.

La vidéo se clôture avec quelques remarques accompagnées d'exemples. La première d'entre elles concerne la cohérence des unités. En effet, lors d'additions et de soustractions, il est nécessaire que les termes du calcul apparaissent tous dans les mêmes unités quitte à les convertir. L'exemple repris à la figure 83 (page ci-après) montre l'addition de deux volumes, le premier étant en litres et le second en centilitres. Les deux valeurs sont converties en centilitres avant d'effectuer le calcul. Elles auraient aussi pu être converties en litres.

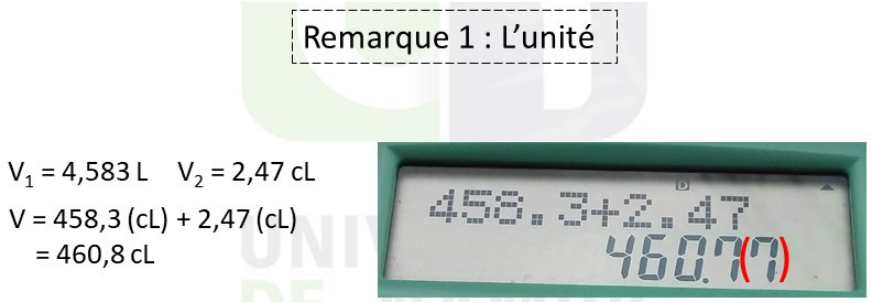


Figure 83 : Cohérence des unités lors d'additions et de soustractions

La seconde remarque a pour objet la notation scientifique. Nous rappelons le fonctionnement de la notation scientifique et l'illustrons par divers exemples comme celui de la figure 84. Nous soulignons que, la règle impliquant de connaître la précision de la valeur, il est nécessaire de développer la notation.

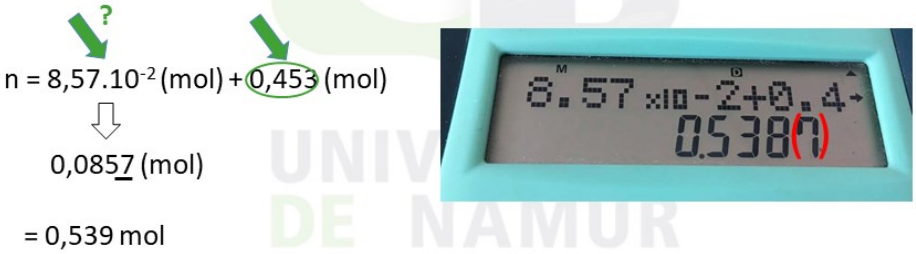


Figure 84 : Notation scientifique et précision

Il faut cependant faire attention à ne jamais convertir une valeur ou développer une notation en ajoutant des zéros à droite du dernier chiffre non nul sous peine d'écrire la valeur avec une précision plus importante qu'elle ne l'est en réalité. Par exemple, si une donnée du calcul est en kilomètres avec une précision au décamètre (ex. : 4,58 km) et l'autre en mètres (ex. : 157 m) et que nous souhaitons avoir toutes les valeurs en mètres, la valeur de la première mesure sera notée $4{,}58.10^3$ m et non 4 580 m. En effet, cette dernière présente une précision au mètre alors que la mesure a une précision au décamètre. Il sera alors préférable de convertir toutes les valeurs en kilomètres. La vidéo se termine par un exemple d'application des règles en tenant compte de cette dernière remarque.

Les exercices proposés sont de deux types. Dans les premiers exercices, les étudiants doivent écrire le résultat d'un calcul qui leur est donné (Figure 85, page ci-après). Ils doivent cependant faire attention à arrondir correctement les valeurs. L'arrondi à faire est bien entendu bancaire.

Convertis la température mesurée en Kelvin et restitue le résultat avec la précision adéquate : T(K) = 17,8 (°C) + 273,15.

K

Réponse :

Calculatrice

$$T\ (K) = 17{,}8 + 273{,}15 = 290{,}95 = 291{,}0\ K$$

Arrondi

1 décimale 2 décimales 1 décimale

Calcule la pression de dihydrogène et restitue le résultat avec la précision adéquate :

P_{H2} (Torr) = 748 - 5,0 - 15,284

Torr

Réponse :

Calculatrice

$$P_{H_2} = 748 - 5{,}0 - 15{,}284 = 727{,}716 = 728\ Torr$$

Arrondi

0 décimale 1 décimale 3 décimales 0 décimale

Figure 85 : Deux premiers exercices liés à la vidéo « Précision des résultats lors d'opérations d'addition et de soustraction »

Les deux exercices suivants impliquent que les étudiants effectuent eux-mêmes les calculs. Ils doivent convertir les valeurs ou développer la notation scientifique (Figure 86, page ci-après).

Additionne les deux masses données et restitue le résultat avec la précision adéquate : m_1 = 1,94 g et m_2 = 354 mg

N'oublie pas d'indiquer l'unité du résultat.

Réponse :

Calculatrice

$$m = 1{,}94 + 0{,}354 = 2{,}294 = 2{,}29\ g$$

Cohérence des unités

2 décimales 3 décimales 2 décimales

Soustrais les deux valeurs de volume données et restitue le résultat avec la précision adéquate: $V_1 = 5{,}6.10^2$ mL et V_2 = 50 mL

N'oublie pas d'indiquer l'unité de la valeur.

Réponse :

$560 - 50$ Calculatrice

$$V = 5{,}6.10^2 - 0{,}50.10^2 = 510 = 5{,}1.10^2\ mL$$

Notation scientifique

1 décimale 2 décimales 1 décimale

Figure 86 : Derniers exercices liés à la vidéo « Précision des résultats lors d'opérations d'addition et de soustraction »

4.5. Vidéo 3 : Les chiffres significatifs

La troisième vidéo a pour sujet une construction purement didactique : les chiffres significatifs. L'objectif de cette vidéo est de donner du sens au chiffre « zéro ». La catégorie d'erreurs commises visée est donc la troisième. Comme mentionné précédemment, le chiffre « zéro » n'a pas le même sens en mathématiques et en sciences expérimentales. En mathématiques, les « zéros » permettent de situer le rang ou l'ordre de chaque chiffre du nombre (milliers, centaine, dizaine, unité, dixième, …). Lors de la retranscription d'un nombre en notation scientifique, les « zéros » à gauche du premier chiffre non nul et à droite du dernier chiffre non nul sont éliminés. Or, en sciences expérimentales, ces « zéros » situés à droite du dernier chiffre non nul sont indicatifs de la précision de la mesure. Il est donc nécessaire de les garder lors de la transformation en notation scientifique.

La vidéo débute par une définition de ce que sont les chiffres dits significatifs c'est-à-dire les chiffres certains de la mesure ainsi que le premier chiffre incertain. Ce dernier

correspond au premier chiffre non nul de l'incertitude. S'ensuit une explication sur la façon de les compter, notamment lorsque la valeur comporte des « zéros ». Mais avant cela, nous explicitons la distinction entre les mathématiques et les sciences expérimentales en stipulant que les « zéros » présents à gauche du dernier chiffre non nul sont, en sciences, indicatifs de la précision de la valeur et sont donc significatifs (Figure 87). En mathématiques, la valeur « 5 » ne sera jamais reportée avec des « zéros ». Cela n'aurait pas de sens. Par contre, en sciences expérimentales, la valeur « 5 » peut, par exemple, provenir d'une pesée. La balance a une certaine précision que la valeur doit refléter. Si la balance est précise au centième de gramme, il faut reporter une valeur également précise au centième c'est-à-dire « 5,00 » dans ce cas-ci.

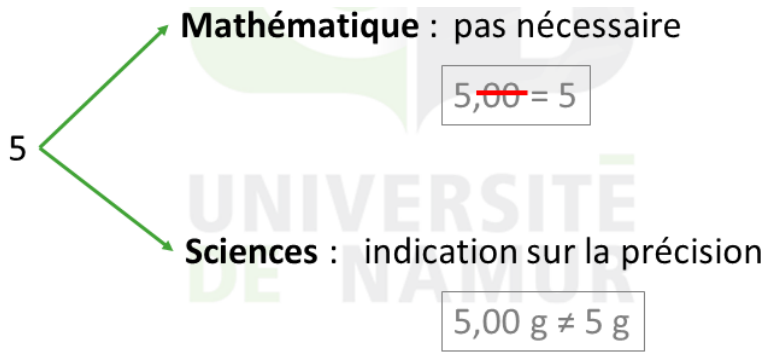


Figure 87 : Différence de signification du chiffre « zéro » en mathématique et en sciences expérimentales

Nous présentons et illustrons ensuite les différents cas de nombres comportant des zéros (Figure 88) et mentionnons que, s'il s'agit d'un nombre décimal, la position de la virgule n'a aucune importance. Les « zéros » à gauche du premier chiffre non nul ne sont pas significatifs contrairement à ceux qui sont inclus dans le nombre ou situés à droite du dernier chiffre non nul. Le choix de décrire un nombre par des 0 et des X lors de l'explication de la manière de compter les chiffres significatifs a été fait dans le but de rester le plus général possible.

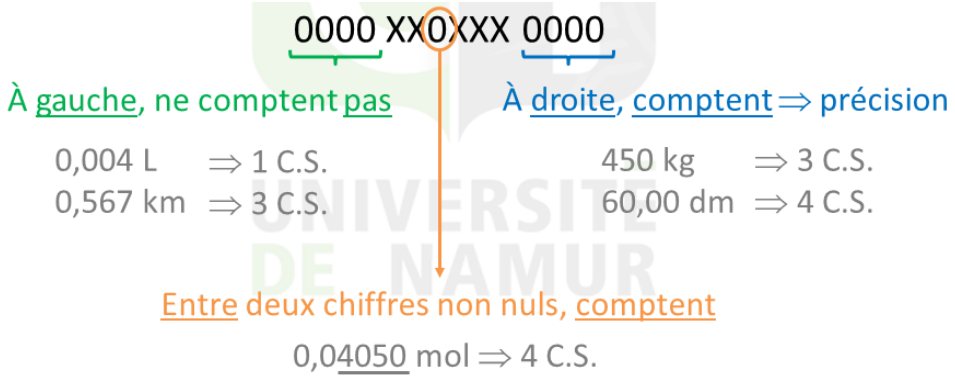


Figure 88 : Signification du chiffre « zéro » en fonction de sa position dans un nombre

Des remarques sur l'utilisation de la notation scientifique terminent la vidéo (Figure 89). Nous rappelons ce qu'est la notation scientifique, les commentaires des encadrants sollicités pour avis laissant à penser qu'il existe parfois des confusions entre notation scientifique et notation décimale. La notation scientifique est ensuite illustrée et son avantage est présenté : un nombre écrit en notation scientifique ne comporte que les chiffres significatifs, la puissance de 10 n'intervenant pas. Nous précisons cependant de faire attention lors de la transformation d'une valeur se finissant par un ou plusieurs « zéros » en notation scientifique. Il est en effet nécessaire de les retranscrire. Nous prenons l'exemple de deux masses pesées avec des balances de précision différente : 2000 g et 2.10^3 g. La seconde valeur ne peut absolument pas s'écrire 2000 g car la balance utilisée pour la pesée est précise au kilogramme. Par contre, la première masse peut s'écrire $2{,}000.10^3$ g. Le tout est de retranscrire la valeur en respectant la précision de l'appareil utilisé.

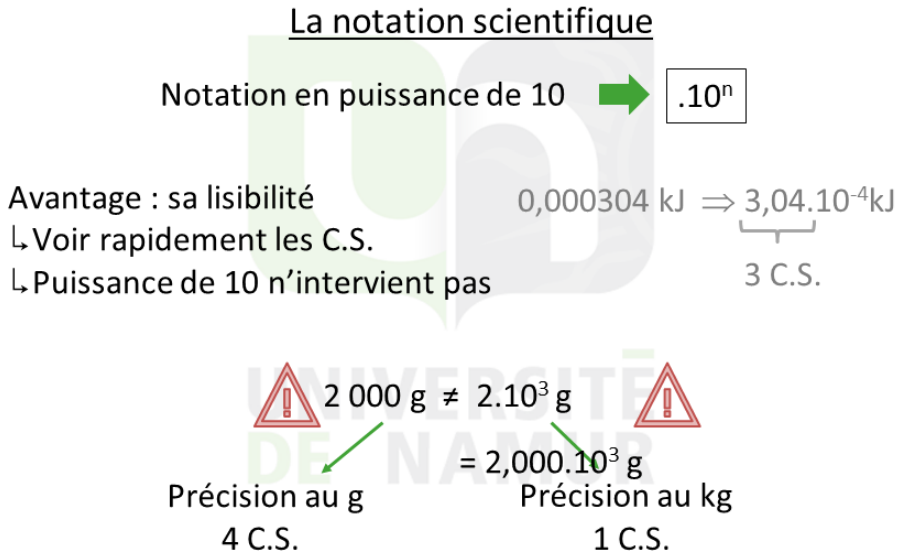


Figure 89 : Remarque sur la notation scientifique

Comme pour la première vidéo, les exercices portent à la fois sur la vidéo et sur une fiche technique, la fiche traitant de la façon d'arrondir des valeurs. Ainsi, le premier exercice, repris à la figure 90 (page ci-après), permet de vérifier la compréhension qu'ont les étudiants de la manière d'arrondir en tenant compte de l'incertitude absolue sur les mesures effectuées. Les réponses attendues sont respectivement 4,73 L ; 327,650 g et 56,98 Torr.

A partir des incertitudes fournies, quelles valeurs devront être reportées sur une feuille de résultats ?

i) V = 4,72907 L Δ V = ± 0,03 L

L

ii) m = 327,65003 g Δ m = ± 1 mg

g

iii) P = 56,982301 Torr Δ P = ± 0,020 Torr

Torr

Figure 90 : Premier exercice lié à la vidéo « Les chiffres significatifs »

Le second exercice (Figure 91) traite du nombre de chiffres significatifs. Les étudiants doivent compter le nombre de chiffres significatifs de chacune des mesures en tenant compte des « zéros » s'ils sont situés à droite du dernier chiffre non nul. Ainsi, les réponses à cet exercice sont respectivement 4, 3 et 6.

Combien de chiffres significatifs ces mesures comptent-elles ?

m = 0,08130 kg

V = 51,0 mL

P = 1013,20 hPa

Figure 91 : Deuxième exercice lié à la vidéo « Les chiffres significatifs »

Le troisième et dernier exercice lié à cette vidéo implique de convertir des valeurs dans d'autres unités (Figure 92, page ci-après). Les étudiants doivent de nouveau faire attention au chiffre « zéro ». Ils ne peuvent pas en ajouter à droite du dernier chiffre indiqué sous peine d'augmenter la précision de la valeur. Ainsi, la première valeur à reporter est 3.10^3 mm et non 3000 mm. Ils ne peuvent pas non plus éliminer les « zéros »

terminant le nombre pour éviter de diminuer la précision du nombre. Les valeurs à reporter sont respectivement $50{,}00.10^{-3}$ L ou 0,05000 L et pas 5.10^{-2} L ou 0,05 L ; 2,000 kg et pas 2 kg ; 13,0 cm et pas 13 cm.

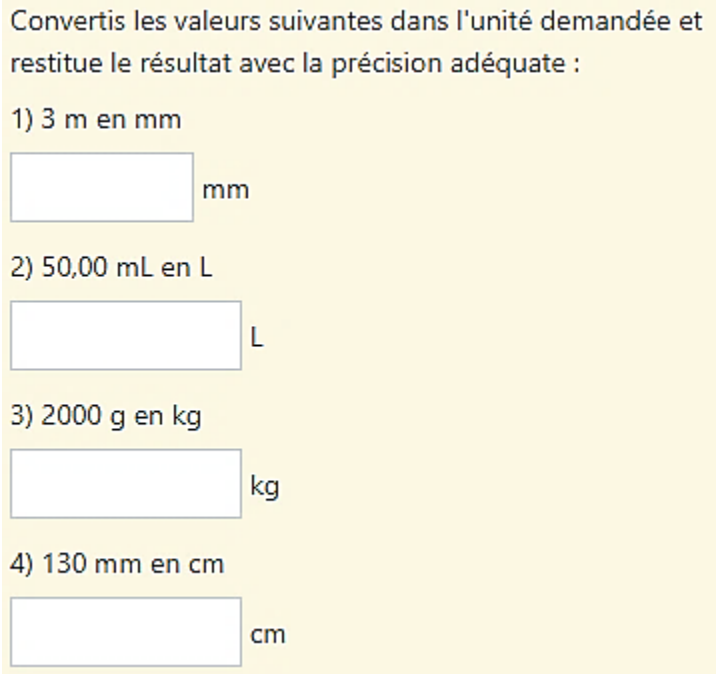


Figure 92 : Troisième exercice lié à la vidéo « Les chiffres significatifs »

4.6. Vidéo 4 : Précision des résultats lors d'opérations de multiplication et de division

La quatrième vidéo traite de l'écriture de valeurs issues d'opérations de multiplication et/ou de division. Nous y poursuivons les mêmes objectifs liés aux catégories d'erreurs commises par les étudiants que dans la deuxième vidéo :

- donner du sens à la règle (Catégorie 1) ;
- sensibiliser au fait que la précision d'un résultat ne peut pas être supérieure à celle de la mesure la moins précise (Catégorie 2).

Cette vidéo débute par un rappel : le résultat d'un calcul ne peut pas être plus précis que les valeurs qui l'ont engendré. Nous rappelons aussi qu'il existe deux types d'incertitudes : l'incertitude absolue et l'incertitude relative. Dans les opérations de multiplication et de division, c'est l'incertitude relative qui a un impact sur la précision du résultat. L'incertitude relative est définie comme le rapport entre l'incertitude absolue et la mesure. Nous montrons que l'incertitude relative sera d'autant plus basse que l'incertitude absolue sera petite et la valeur de la mesure importante (Figure 93, page ci-après).

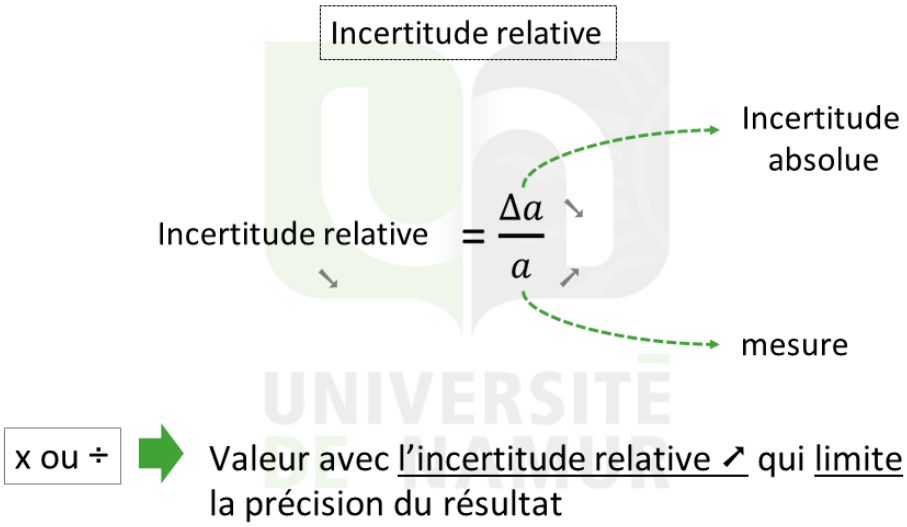
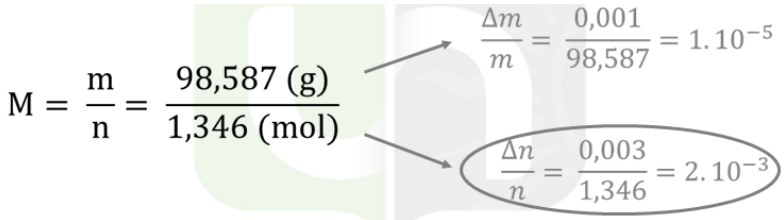


Figure 93 : Définition de l'incertitude relative

Ensuite, nous présentons un exemple dans lequel les incertitudes relatives de chaque valeur sont calculées (Figure 94).



Le résultat d'une multiplication ou d'une division a autant de **chiffres significatifs** que la mesure qui en comporte **le moins**.

Figure 94 : Introduction à la règle à appliquer lors de multiplication et de division

Ainsi, l'incertitude relative sur la masse est calculée en faisant le rapport entre l'incertitude absolue de la balance et la masse indiquée. De même, l'incertitude relative sur la quantité de matière est obtenue en divisant l'incertitude absolue sur la quantité de matière par la valeur de la quantité de matière. Nous avons choisi une incertitude absolue sur la quantité de matière différente de 0,01 pour deux raisons. La première concerne la façon dont est obtenue la valeur de la quantité de matière. Cette valeur n'a pas pu être obtenue par mesure directe. C'est donc elle-même une quantité dérivée dont la précision dépend des incertitudes sur les valeurs qui ont permis de la calculer. La seconde raison est liée aux valeurs d'incertitudes habituellement présentes sur les appareils de mesure. Ces appareils ne présentent pas toujours une précision dont l'ordre est indiqué par le chiffre « 1 ». Une fois les incertitudes relatives déterminées, nous expliquons que celle qui

possède l'incertitude relative la plus élevée a un impact plus important sur la précision du résultat. Nous citons alors la règle à appliquer et l'appliquons à notre exemple.
Par la suite, nous présentons le lien entre l'incertitude relative et le nombre de chiffres significatifs de la mesure (Figure 95). Lorsque le nombre de chiffres significatifs d'une valeur diminue, l'incertitude relative de cette même valeur augmente. Ainsi, si la valeur de la quantité de matière présente moins de chiffres significatifs, soit par une perte en précision (Δa augmente), soit par une diminution de la valeur (a diminue), l'incertitude relative augmente. Donc, si le nombre de chiffres significatifs d'une valeur est petit, l'incertitude relative de cette valeur est grande et sa précision petite. Elle a plus d'impact sur la précision du résultat. De nouveau, ce lien fait avec l'incertitude a pour objectif de donner du sens à la règle et d'éviter que les étudiants n'inversent les deux règles.

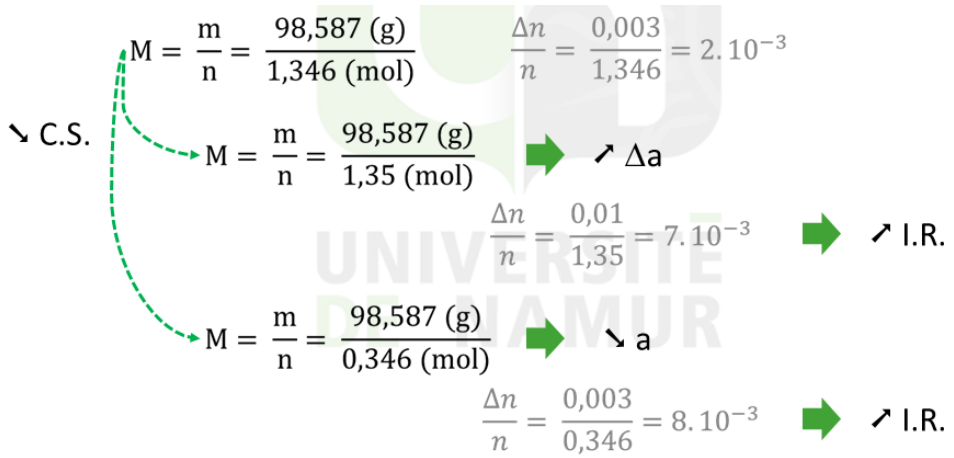


Figure 95 : Lien entre l'incertitude relative des facteurs et la règle à appliquer

La règle est ensuite illustrée par l'un ou l'autre exemple dont un impliquant une valeur écrite en notation scientifique (Figure 96). Nous montrons que la valeur ne doit pas être développée car la notation scientifique ne fait apparaître que les chiffres significatifs. Une fois le calcul effectué, nous mentionnons que le résultat obtenu peut aussi être écrit en notation scientifique.
Pour terminer la vidéo, un commentaire est fait sur la cohérence des unités.

3 C.S. 4 C.S.

$$n = C \times V = 1{,}00\ (mol.L^{-1}) \times 1{,}570.10^{-4}\ (L)$$
$$= 0{,}0157\ mol$$
$$= 1{,}57\ .10^{-2}\ mol$$

Figure 96 : Exemple de multiplication impliquant une valeur écrite en notation scientifique

Dans les exercices liés à cette vidéo (Figure 97), les étudiants doivent à chaque fois restituer le résultat d'un calcul avec la précision adéquate. Ils doivent faire attention à rajouter des « zéros » quand cela est nécessaire, à arrondir correctement les valeurs et à rester cohérent au niveau des unités. Les réponses aux exercices sont présentées sous chacun d'entre eux à la figure 97.

Voici la transformation de la pression exercée par une colonne d'eau de 68 mm en Torr: $P = \frac{68}{13{,}6}$

Restitue le résultat avec la précision adéquate.

Torr

Réponse :

2 chiffres significatifs

Calculatrice

$$P = \frac{68}{13{,}6} = 5 = 5{,}0$$

Signification du zéro

2 chiffres significatifs

3 chiffres significatifs

La masse d'une bandelette de magnésium peut être calculée en multipliant sa longueur par la masse linéique du ruban : $m = l \cdot \mu$

Sachant que la longueur du ruban est de 137 mm et que la masse linéique μ vaut 18,750 mg.cm^{-1}, calcule la masse du ruban (en mg) et restitue la valeur avec la précision adéquate.

mg

Réponse :

Calculatrice

$$m = 13{,}7 \,.\, 18{,}750 = 256{,}875 = 257\ mg$$

Arrondi

3 chiffres significatifs 5 chiffres significatifs 3 chiffres significatifs

Lors d'une réaction en solution aqueuse, l'énergie thermique peut être calculée de la manière suivante : Q = m . c . ΔT

où Q est l'énergie thermique (J), m est la masse de la solution (g), c est la capacité thermique massique de la solution (J.g^{-1}.K^{-1}) et ΔT est la variation de température (K).

Calcule la quantité d'énergie thermique (en J) si m = 2,459 kg , c = 4,184 J.g^{-1}.K^{-1} et ΔT = 25,3 K. Restitue le résultat avec la précision adéquate.

J

Réponse :

5 chiffres significatifs Calculatrice

$$Q = 2\,459 \,.\, 4{,}184 \,.\, 25{,}3 = 260297{,}9368 = 260.10^3\ J$$

Cohérence des unités

4 chiffres significatifs 3 chiffres significatifs 3 chiffres significatifs

Figure 97 : Exercices liés à la vidéo « Précision des résultats lors d'opérations de multiplication et de division »

4.7. Vidéo 5 : Les nombres purs et constantes

La cinquième vidéo explique la différence existant entre des nombres purs et des valeurs expérimentales telles que les constantes. Elle a pour objectif de montrer que, dans un calcul, il ne faut tenir compte que des valeurs obtenues expérimentalement, que

ces valeurs soient mesurées ou tabulées. La catégorie d'erreurs visée par cette vidéo est la quatrième.

La vidéo débute par la définition d'un « nombre pur » c'est-à-dire toute valeur ne provenant pas de mesure. Des exemples illustrent le propos. Ainsi, le nombre de titrages effectués n'intervient pas dans la détermination de la précision de la moyenne des volumes, le nombre « 100 » n'a pas d'influence sur la précision d'un pourcentage, les coefficients stœchiométriques ne limitent pas la précision des quantités de matière, etc. A la suite de ces exemples, nous stipulons qu'un nombre pur n'aura pas d'influence sur le résultat (Figure 98).

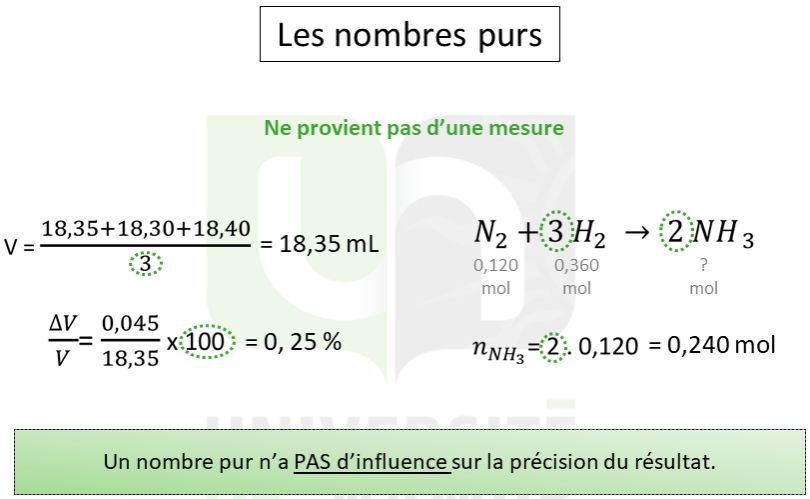


Figure 98 : Définition d'un nombre pur et illustrations

Par la suite, une « constante » est définie comme une valeur expérimentale tabulée : la constante des gaz parfaits, la constante d'Avogadro, la masse molaire ou encore la constante de Planck en sont des exemples. Toutes ces valeurs sont issues de mesures et ont donc une incertitude définie. La constante, dans un calcul, doit être suffisamment précise pour ne pas avoir d'influence sur la précision du résultat (Figure 99, page ci-après).

Parfois, la constante elle-même ne présente pas une précision suffisante. C'est alors elle qui limite la précision du résultat. Les constantes sont en effet des valeurs obtenues expérimentalement. Nous n'en faisons pas mention dans la vidéo car, de manière générale, l'erreur commise par les étudiants est de considérer que toutes les valeurs sont obtenues expérimentalement. Ils considèrent alors qu'ils doivent tenir compte de la « précision » des nombres purs lors de l'écriture du résultat alors qu'il n'en est rien. Nous ne pensons donc pas qu'il soit utile de préciser que, si la constante est la valeur la moins précise, c'est elle qui limitera la précision du résultat, d'autant que cela est sous-entendu à plusieurs reprises dans nos propos.

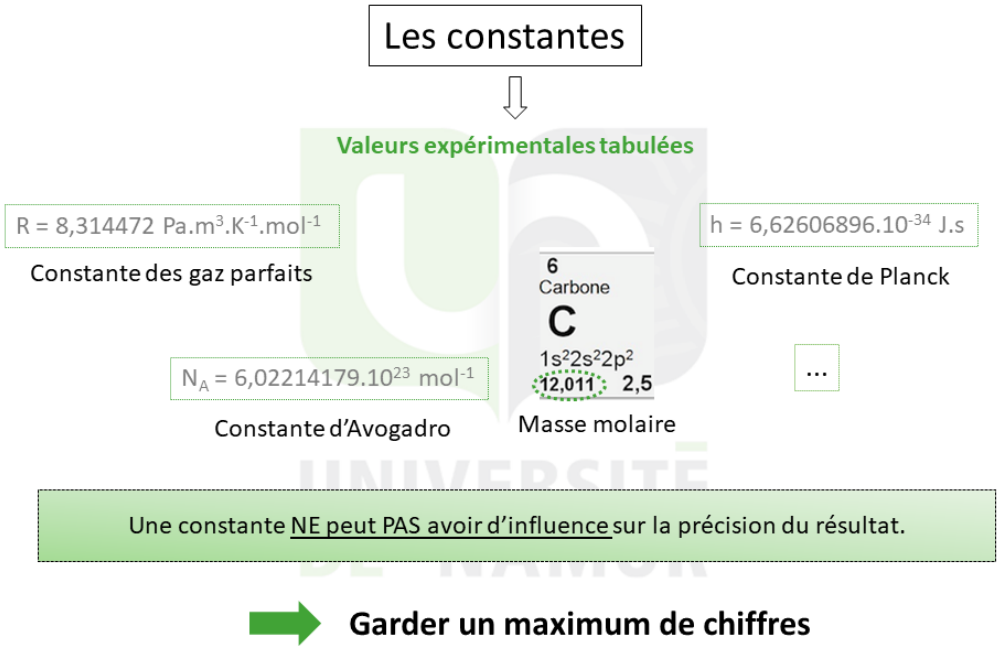


Figure 99 : Définition d'une constante et illustrations

La vidéo fait état de la possibilité d'arrondir les constantes mais ce n'est pas conseillé. Pourtant, c'est une pratique assez courante en sciences expérimentales. Par exemple, il n'est pas rare de considérer que la constante de Planck est de $6{,}63.10^{-34}$ J.s alors qu'elle est reportée comme étant égale à $6{,}62606896(33).10^{-34}$ J.s ou que la constante d'Avogadro est de $6{,}02.10^{23}$ mol^{-1} alors qu'une valeur plus précise peut être reportée : $6{,}02214179(30).10^{23}$ mol^{-1} (Lide, 2009). Si cela devait cependant être fait, il est nécessaire que cet arrondi n'ait pas d'impact sur la précision du résultat. Ainsi, une constante doit, au minimum, conserver le même nombre de décimales que le terme qui en comporte le moins dans le cas d'une addition ou d'une soustraction ou conserver le même nombre de chiffres significatifs que le facteur qui en possède le moins dans le cas d'une multiplication ou d'une division. Ceci est illustré à l'aide de deux exemples, un pour chacun des types d'opération. Dans le cas des multiplications et divisions, l'exemple donné est celui du calcul d'une quantité de matière à partir d'une masse comportant trois chiffres significatifs. La constante à arrondir est alors la masse molaire qui, pour respecter la règle, doit être reportée avec au minimum trois chiffres significatifs également. En ce qui concerne les additions et soustractions, l'exemple est celui du calcul d'une pression partielle en gaz à partir d'une pression totale mesurée précise à l'unité. Dans ce calcul, il faut retrancher à la pression totale les pressions partielles des autres gaz. Dans ce cas-ci, il faut retrancher la tension de vapeur de l'eau à la pression totale mesurée. Les valeurs de tension de vapeur d'eau sont tabulées en fonction de la température. Si la pression mesurée est précise à l'unité, il faut que la tension de vapeur d'eau soit elle aussi au

moins précise à l'unité pour ne pas avoir d'influence sur la précision du résultat. Elle peut dont être arrondie à l'unité. Bien entendu, il est possible que la valeur du résultat change quand la constante est arrondie. En fait, tout arrondi implique un changement de la valeur du résultat, notamment sur les derniers chiffres affichés par la calculatrice. Il ne faut cependant pas oublier que tout résultat expérimental est entaché d'incertitude. La valeur obtenue n'est pas à penser comme une valeur « point », unique mais comme un intervalle de valeurs. La mesure se situe entre x – U(x) et x + U(x) où x représente la mesure et U(x) son incertitude absolue. Le dernier chiffre du résultat est donc de toute façon un chiffre incertain.

Le premier exercice lié à cette vidéo est un texte à trous (Figure 100). Les étudiants doivent choisir la nature de telle ou telle valeur du calcul : est-ce un nombre pur ou une constante ? Ils ont, pour cela, accès à un menu déroulant qui leur laisse le choix entre ces deux termes. Dans ce cas-ci, le chiffre « 2 » est un nombre pur tandis que « π » est une constante.

Dans la formule permettant de déterminer le périmètre d'un cercle (p = 2.π.R), 2 est [ ] et π [ ]

Figure 100 : Premier exercice lié à la vidéo « Les nombres purs et constantes »

Le second exercice est en lien avec le premier. Les étudiants doivent utiliser la formule utilisée lors du premier exercice pour effectuer un calcul et reporter le résultat avec la précision adéquate (Figure 101). Etant donné que le rayon est donné avec deux chiffres significatifs, la valeur du périmètre doit elle aussi être transcrite avec deux chiffres significatifs : 38 cm. Comme la valeur affichée par la calculatrice est de 37,69911184, ils doivent aussi penser à arrondir correctement la valeur.

Détermine le périmètre (en cm) d'un cercle de rayon 6,0 cm.
Retranscris le résultat avec la précision adéquate. Utilise la touche πde la calculatrice pour effectuer le calcul.

Rappel : p = 2.π.R

Figure 101 : Deuxième exercice lié à la vidéo « Les nombres purs et constantes »

Dans les exercices suivants, les étudiants doivent déterminer le nombre de chiffres minimal que doit avoir la constante pour ne pas avoir d'influence sur la précision du résultat (Figure 102, page ci-après). Ils doivent donc, dans chaque cas, déterminer la règle à employer pour écrire le résultat avec la précision adéquate, compter le nombre de chiffres significatifs ou le nombre de décimales des valeurs du calcul et déterminer le nombre minimal de chiffres significatifs ou de décimales que doit avoir la constante avant

de donner le nombre de chiffres qu'elle doit avoir. Les réponses aux exercices sont reprises sous les énoncés à la figure 102.

Quel nombre de chiffres minimal doit comporter la masse molaire du lithium (M = 2,941 g.mol^{-1}) pour ne pas avoir d'influence sur la restitution du résultat du calcul ci-après avec une précision adéquate ?

$m = \frac{4,460}{M}$

Réponse :

4 chiffres significatifs

$$m = \frac{4,460}{M}$$

Min 4 chiffres significatifs

Ne peut pas avoir d'influence sur le nombre de chiffres significatifs du résultat

Quel nombre de chiffres minimal doit comporter la constante de Planck (h = 6,6260693(11).10^{-34} J.s) pour ne pas avoir d'influence sur la restitution du résultat du calcul ci-après avec une précision adéquate ?

E = h . υ = h . 1,16.10^{15}

Réponse :

3 chiffres significatifs

$$E = h\,.\,1,16.\,10^{15}$$

Min 3 chiffres significatifs

Ne peut pas avoir d'influence sur le nombre de chiffres significatifs du résultat

Quel nombre de chiffres minimal doit comporter la tension de vapeur de l'eau à 22,0°C (P_{eau} = 19,827 Torr) dans le calcul suivant pour ne pas avoir d'influence sur la restitution du résultat avec une précision adéquate.

P (Torr) = 752,1 - 5,6 - P_{eau}

Réponse :

1 décimale

$$P\ (Torr) = 752,1 - 5,6\ -\ P_{H_2O}$$

Min 1 décimale

Ne peut pas avoir d'influence sur le nombre de décimales du résultat

Figure 102 : Derniers exercices liés à la vidéo « Les nombres purs et constantes »

4.8. Vidéo 6 : Méthode de résolution

Cette sixième et dernière vidéo résulte d'un entretien effectué avec l'étudiant n'ayant commis aucune erreur lors du test. Comme il est très systématique lors du report de ses résultats et qu'il ne se trompe pas, nous avons décidé de présenter sa démarche :

1. définir le type d'opération impliqué dans le calcul ;
2. se rappeler de la règle à employer ;
3. analyser les différentes valeurs du calcul en fonction de la règle à appliquer ;
4. appliquer la règle.

La vidéo a pour objectif de proposer cette méthodologie.

La vidéo commence par un rappel des différentes règles à appliquer présentées dans les vidéos précédentes (Figure 103).

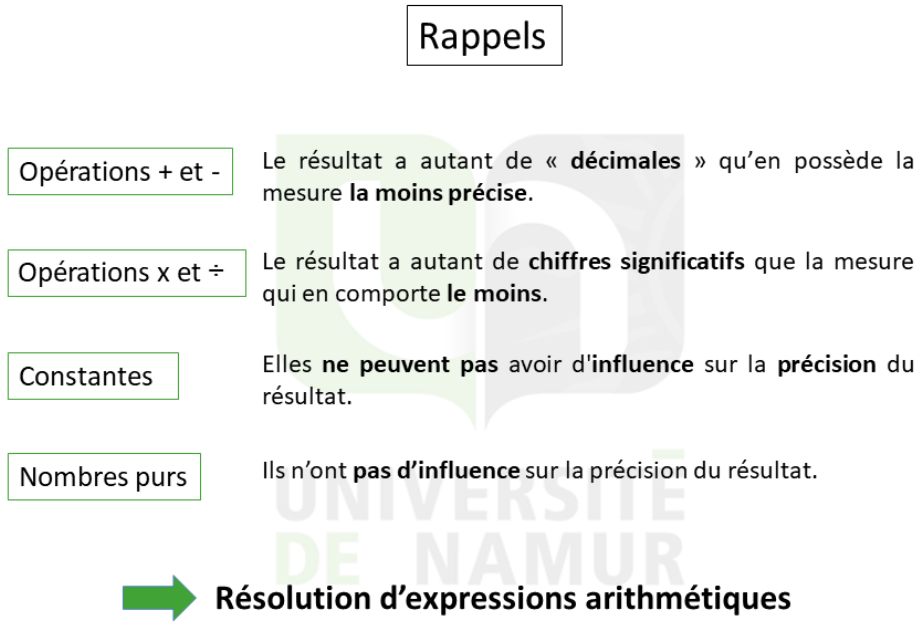


Figure 103 : Rappel des différentes règles à appliquer pour reporter le résultat d'un calcul avec la précision adéquate

Ensuite, nous présentons et illustrons une méthode de résolution applicable à n'importe quelle expression mathématique des plus simples, ne comprenant qu'un seul type d'opération, aux plus complexes, en comportant plusieurs. Pour illustrer, nous prenons le calcul d'une quantité de matière de gaz (Figure 104, page ci-après).

Traitement d'expressions arithmétiques

$$n = \frac{97\,058\,.\,0{,}0546}{8{,}315\,.\underbrace{(17{,}8 + 273{,}15)}_{A}} \quad B$$

Partie du calcul	Résultat affiché par la calculatrice	Résultat écrit avec une précision correcte
A= 17,8 + 273,15	290.95	291,0 (4 C.S)
B = $\frac{97\,058\,.\,0{,}0546}{8{,}315\,.\,A}$ (5 C.S, 3 C.S, 4 C.S, 4 C.S)	2.190764016	2,19

2,19 mol

Figure 104 : Application des règles au travers du traitement d'une expression arithmétique

Dans l'exemple de la figure 104, voici la formule à employer :

$$n\ (mol) = \frac{P\ (Pa).V(m^3)}{R\ (Pa.m^3.mol^{-1}.K^{-1})\,.\,(T(°C) + 273{,}15)}$$

Dans cette formule, P est la pression, V le volume, R la constante des gaz parfaits et T la température. La température est mesurée en degré Celsius et transformée en kelvin.
Nous avons choisi ce calcul car cette formule comporte plusieurs types d'opérations : multiplications, division et addition.
Cette méthode est la suivante :

- Traiter le calcul en suivant l'ordre de priorité des opérations
- Pour chaque opération :
  - déterminer le type d'opération ;
  - se rappeler de la règle à appliquer ;
  - trouver la valeur limitant la précision du résultat ;
  - reporter la valeur en n'oubliant pas, éventuellement, de l'arrondir.

Ainsi, la première opération à effectuer est l'addition. Le résultat doit compter autant de décimales que la valeur la moins précise. Le premier terme présente une décimale et le second, deux. Le résultat doit s'exprimer avec une seule décimale, après arrondi.
La seconde opération est un mélange de multiplications et de division. Le résultat doit compter autant de chiffres significatifs que le facteur qui en comporte le moins. La valeur du volume compte trois chiffres significatifs contre quatre pour la constante des gaz

parfaits et la température et cinq pour la pression. Le résultat doit donc comporter trois chiffres significatifs. Durant cette seconde étape, il est mentionné que la valeur de la température reprise dans la calculatrice n'est pas la valeur arrondie à quatre chiffres significatifs mais la valeur réellement obtenue, affichée par la calculatrice. Nous n'avons pas réécrit la valeur de A dans la fraction B pour insister sur ce fait. La valeur à indiquer est normalement 291,0. En voyant cela, un étudiant pourrait croire que c'est la valeur dont il faut tenir compte pour faire le calcul alors qu'il est nécessaire de prendre la valeur affichée par la calculatrice, 290,95. En effet, ne considérer que les valeurs arrondies pour faire un calcul peut engendrer, au bout de plusieurs opérations, des erreurs importantes. Un résumé de la méthode clôture la séquence.

Les exercices proposés aux étudiants sont habituellement réalisés en première année d'études dans le cadre du cours de chimie. Etant en début d'année scolaire lorsqu'ils réalisent cette séquence de cours, les formules sont données et les calculs effectués. Le résultat donné est la valeur affichée par la calculatrice. Il leur est demandé de donner le nombre de chiffres que doit comporter la valeur finale pour avoir la précision adéquate. Les réponses des exercices sont reprises sous chaque énoncé à la figure 105 (pages ci-après).

Pour déterminer si une réaction est thermodynamiquement possible, les chimistes calculent une valeur appelée variation d'énergie libre de Gibbs. Elle se calcule comme suit :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

La réaction est spontanée si cette valeur est négative.

A 25°C, la réaction ci-dessous présente un Δ H = -25,0 kJ et un Δ S = - 357,4 $J.K^{-1}$. Le calcul de la variation d'enthalpie libre de Gibbs est donc le suivant, suite aux différentes conversion d'unités :

$$\Delta G = -25,0.10^3 + 298 \times 357,4 = 81505,2J = 81,5052kJ$$

Tous les chiffres affichés par la calculatrice sont ici rapportés. Combien de chiffres doit comporter le résultat de ce calcul pour tenir compte de la précision des différentes valeurs ?

Réponse :

3 chiffres significatifs

3 chiffres significatifs 4 chiffres significatifs

1)

2 chiffres

$$\Delta G = -25{,}0.10^3 + 298\,.357{,}4 = -25{,}0.10^3 + 107.10^3 = 82.10^3\ J$$

1 décimale 0 décimale

2)

0 décimale

Dans le tableau périodique de Mendeléev sont reprises les masses atomiques relatives des éléments. Ces dernières résultent d'une moyenne pondérée des masses atomiques de chaque isotope de l'élément considéré. Pour le silicium, les masses atomiques et abondances sont reprises dans le tableau ci-dessous :

	Masse atomique (u)	**Abondance (%)**
Isotope 1	27,977	92,23
Isotope 2	28,977	4,67
Isotope 3	29,974	3,10

Le calcul de la masse atomique relative est alors le suivant :

$$Ar = \frac{27{,}977 \times 92{,}23 + 28{,}977 \times 4{,}67 + 29{,}974 \times 3{,}10}{100} = 28{,}085607$$

Tous les chiffres affichés sur l'écran de la calculatrice sont repris. Combien de chiffres doit comporter la valeur du résultat pour présenter la précision adéquate ?

Réponse :

1) 2) 3)

5 C.S. 4 C.S. 5 C.S. 3 C.S. 5 C.S. 3 C.S.

1) 2) 3)

4 C.S. 3 C.S. 3 C.S.

$$Ar = \frac{27{,}977\,.\,92{,}23 + 28{,}977\,.\,4{,}67 + 29{,}974\,.\,3{,}10}{100} = \frac{2580 + 135 + 92{,}9}{100} = \frac{2808}{100} = 28{,}08$$

4)

0 D. 0 D. 1 D.

4)

0 D.

$$Ar = \frac{2580 + 135 + 92{,}9}{100} = \frac{2808}{100} = 28{,}08$$

4 chiffres

Nombre pur

C.S. = chiffres significatifs
D. = décimale

Figure 105 : Exercices liés à la vidéo « Méthode de résolution »

La réflexion autour de ces exercices doit se faire minutieusement. En effet, les règles à utiliser étant issues d'une transposition didactique, le résultat ne présente pas toujours la même précision que si une méthode plus experte est employée. De plus, ces règles dépendant de l'opération à effectuer, la précision des résultats peut différer avec l'ordre dans lequel ces opérations sont réalisées, comme dans l'exercice présenté à la figure 106.

Pour calculer la quantité d'énergie thermique transférée (Q en kJ), il faut multiplier la masse du corps (m en kg) par sa capacité thermique massique (c en $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$) et par la variation de température (ΔT en °C). Soit :

$$Q = m.c.(T_f - T_i)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 300 litres d'eau de 20 à 100°C sachant que la capacité thermique massique de l'eau est de 4,184 $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$ se calcule de la manière suivante :

$$Q = 300\,.\,4{,}184\,.\,(100 - 20) = 100\,416\ kJ$$

Tous les chiffres affichés par la calculatrice sont ici rapporté. Combien de chiffres doit comporter le résultat de ce calcul pour tenir compte de la précision des différentes valeurs ?

Figure 106 : Exercice impliquant les deux types d'opérations

Dans cet exercice, si la soustraction est effectuée avant les multiplications, le résultat doit présenter deux chiffres significatifs. En effet, les deux termes de la soustraction sont précis à l'unité. Le résultat de la différence de ces deux valeurs ne doit donc pas avoir de

décimale. Il comporte alors deux chiffres significatifs. Les opérations suivantes sont des multiplications. Les autres facteurs du calcul comptant respectivement trois et quatre chiffres significatifs, le résultat final ne peut présenter que deux chiffres significatifs :

$$Q = 300\,.\,4{,}184\,.\,(100 - 20) = 300\,.\,4{,}184\,.\,80 = 10.\,10^4\ kJ$$

Par contre, si la première multiplication est effectuée et que la valeur obtenue est distribuée sur chacune des valeurs de la parenthèse, le résultat final présente trois chiffres significatifs. Le premier et le deuxième facteur comptent respectivement trois et quatre chiffres significatifs. Le résultat de cette première multiplication doit présenter trois chiffres significatifs. La multiplication de la valeur obtenue avec le premier terme de la parenthèse donne aussi un résultat comptant trois chiffres significatifs. La multiplication avec le second terme de la parenthèse donne quant à lui un résultat avec deux chiffres significatifs. Le calcul se termine par une soustraction. Les deux valeurs sont précises au millier. Le résultat doit donc être précis, lui aussi, au millier. Il compte alors trois chiffres significatifs.

$$Q = 300\,.\,4{,}184\,.\,(100\ - 20) = 1{,}26.\,10^3\,.\,(100 - 20) = 1{,}26.\,10^5 - 2{,}5.\,10^4 = 100.\,10^3\ kJ$$

Il est donc nécessaire d'être prudent avec les règles employées pour restituer un résultat avec la précision adéquate.

4.9. Accès à la séquence de cours

Les étudiants ont accès à l'outil au travers de la plateforme de cours en ligne sur laquelle la séquence de cours est nommée « Parcours : Restitution d'un résultat avec la précision adéquate ». Avant de débuter la séquence de cours, les étudiants doivent lire un fichier pdf dans lequel le fonctionnement du parcours est expliqué (Figure 107).

Il s'agit d'un parcours. Il y a donc une série d'étapes à passer.
Il débute par la fiche « Vocabulaire lié aux activités expérimentales » et la vidéo « Mesures et incertitudes ». Une fois la vidéo visionnée, la séance d'exercices associée est libérée. Ce n'est qu'une fois que la séance d'exercice a été exécutée que la vidéo suivante est disponible.
Pour revenir aux activités composant le parcours et passer à la vidéo, fiche ou séance d'exercices suivante, cliquez sur « Parcours : restitution d'un résultat avec la précision adéquate ».

Faites ce parcours avec attention. Les notions abordées seront d'une grande importance tout le long de votre cursus.

Figure 107 : Explication du fonctionnement de la séquence de cours

La suite du document donne une série de consignes pour effectuer les exercices (Figure 108).

Dans les exercices :

- Les nombres à virgule doivent être écris avec une ***virgule et pas un point*** :
  2,5 et pas 2.5
- Pour écrire les exposants : utiliser la touche sur laquelle sont repris le carré et le cube

Si vous n'avez pas cette touche-là ou que vous souhaitez écrire d'autres exposants, tapez l'exposant précédé de son signe (+ ou -) juste après la base (le nombre sur lequel porte l'exposant)

Exemples : Pour $2{,}5.10^{-5}$, tapez 2,5.10-5
Pour 3.10^{7}, tapez 3.10+7

- Faites attention aux unités. Si elles ne sont pas déjà inclues dans la réponse, il faut que vous les indiquiez.
- Chacune de vos réponses libère un feedback spécifique. Dans certaines questions, il apparaît directement sous la réponse une fois validée. S'il n'apparaît pas, glisser la flèche de la souris sur la réponse. Il apparaîtra.
- Vous avez parfois droit à une autre tentative… mais il faut la payer (Prix = 50 % de la note de la question)

Figure 108 : Consignes pour faire les exercices

De manière à pousser les étudiants à visionner toutes les vidéos et à exécuter les exercices associés, chaque élément de la séquence doit être marqué comme achevé avant de passer au suivant. Ils ont la possibilité, par la suite, de ne regarder que la ou les vidéos d'intérêt et de ne refaire que la ou les séries d'exercices en fonction de leurs difficultés.

5. Synthèse

Le dispositif d'enseignement mis en place tient compte de diverses contraintes d'ordre institutionnelles, pédagogiques et didactiques mais également d'hypothèses posées à l'occasion d'une analyse a priori. Ces hypothèses portent sur les acquis et préconceptions que pourraient avoir les étudiants et qui expliqueraient les erreurs commises lors du report de résultats avec une précision adéquate. Le manque de sens des règles employées, la crainte de perdre en précision et la différence de signification du chiffre zéro entre sciences expérimentales et mathématiques pourraient respectivement justifier les tendances qu'ont les étudiants à utiliser la règle inadéquate, faire l'opposé de ce que préconise la règle et à changer le sens donné au chiffre « zéro ». En ce qui concerne plus particulièrement les nombres purs considérés comme des valeurs expérimentales, il est possible que les étudiants ne fassent pas la distinction entre les valeurs obtenues expérimentalement et celles qui ne le sont pas. Le tableau 29 (page ci-après) reprend les éléments mis en place au travers de l'outil pour tenir compte de ces hypothèses.

La sixième et dernière vidéo présente une méthode systématique pour reporter les résultats expérimentaux avec une précision adéquate. Cette vidéo trouve son origine dans l'idée que les étudiants ont besoin d'une méthode à laquelle se raccrocher.

Hypothèse posée	***Composante du dispositif***
Manque de sens des règles	Vidéo 3 : Séparation nette des deux vidéos présentant les règles à employer Vidéos 2 et 4 : Présentation du lien entre l'incertitude, absolue ou relative, et les règles
Peur de perdre en précision	Fiche technique – Vocabulaire : Présentation des liens entre incertitude, précision et erreur de mesure Vidéo 1 : Illustration de l'incertitude de mesure Vidéos 2 et 4 : Enoncé du lien entre précision et incertitude Expression du fait que la précision d'un résultat ne peut pas être supérieure à celle de la mesure la moins précise Vidéo 3 : Présentation du lien entre incertitude et chiffre significatif
Différence de signification du chiffre zéro entre les sciences expérimentales et les mathématiques	Vidéo 3 : Exposé de la différence de signification du chiffre zéro entre les sciences expérimentales et les mathématiques
Absence de distinction entre les nombres purs et les valeurs expérimentales	Vidéo 5 : Distinction entre nombre pur et constante expérimentale

Tableau 29 : Composantes du dispositif mises en place pour tenir compte des hypothèses posées lors de l'analyse a priori

Chapitre 7
Expérimentation et analyse a posteriori

Une fois conçu, le dispositif doit être expérimenté auprès des étudiants. Cet outil a été construit sur base d'hypothèses posées quant aux acquis et/ou préconceptions que les étudiants pourraient avoir lors du report de résultats avec une précision adéquate. La question de recherche concerne donc ces raisonnements que les étudiants mettent en place lorsqu'ils transcrivent leurs données dans leurs rapports de laboratoire. Dans ce chapitre, nous tentons de corroborer ou d'infirmer les hypothèses susmentionnées.
Pour cela, une comparaison est faite entre les productions des étudiants de 2016-2017, lesquelles sont à l'origine des analyses préalables et a priori, et celles des étudiants de 2018-2019. Les résultats sont présentés après quelques constatations générales sur la participation à la séquence de cours en ligne et un classement des erreurs commises par les étudiants dans les différentes catégories en fonction des opérations envisagées et du nombre de chiffres significatifs des valeurs qui en sont constitutives. Différents angles sont adoptés lors du traitement des résultats. L'impact du cours en ligne est vérifié au niveau :

- des opérations mathématiques effectuées ;
- des catégories d'erreur commises ;
- de la fréquence des erreurs commises par catégorie.

1. Utilisation de la séquence de cours par les étudiants

Sur les 317 étudiants inscrits au cours de Travaux pratiques de chimie, 95 ont suivi le cours en tout ou en partie, ce qui représente 30 % des étudiants. La séquence de cours, lorsqu'elle est suivie par les étudiants, l'est généralement en un ou deux jours. Les étudiants ont tendance à visionner les vidéos et effectuer les exercices associés dans la continuité. Une fois réalisée, la séquence de cours n'est généralement plus consultée par la suite.

2. Classement des erreurs dans les catégories

2.1. Identification des erreurs

Pour rappel, les erreurs commises par les étudiants ont été classées dans différentes catégories :

1. L'utilisation de la règle inadéquate
2. La redéfinition des règles par leur opposé
3. La modification du sens du chiffre « zéro »
4. Le traitement des nombres purs comme des valeurs expérimentales

Les opérations utilisées dans le cadre des analyses n'impliquant pas de nombres purs, il n'est plus fait mention de la quatrième catégorie d'erreurs dans la suite de ce travail.
Les catégories d'erreur ne couvrent pas toutes les erreurs commises car certaines d'entre elles ne concernent pas que la précision mais aussi :

- les arrondis ;
- les conversions d'unités ;
- les unités ;
- la notation scientifique.

Il arrive, en plus que les étudiants :

- emploient des valeurs inadéquates ;
- inventent des valeurs ;
- oublient des valeurs ;
- utilisent incorrectement la calculatrice ;
- …

Le tableau 30 (page ci-après) en reprend quelques exemples provenant des tests des étudiants repris en annexes 4, 12 et 16.

Exemples	***Explication***
Calcul de la masse de magnésium : $13{,}7 \cdot 1{,}875 = 25{,}68$ mg.	Conversion d'unité incorrecte : 18,750 mg.cm^{-1} = 1,875 ?
Calcul de la pression exercée par une colonne d'eau : $\frac{68 \cdot 10^{-2}}{13{,}6} = 0{,}05$	Conversion d'unité incorrecte : 68 mm = 68.10^{-2} m
Calcul de la pression exercée par une colonne d'eau : $\frac{137}{13{,}6} = 10$	Au lieu de prendre la hauteur de la colonne d'eau pour faire le calcul, l'étudiant a pris la longueur du ruban de magnésium transformé en mm.
Transformation d'une température en kelvin : $25°{,}00 + 273{,}15 = 298{,}15$	La valeur « 25,00 » ne provient pas du test
Calcul de la masse de magnésium : $13{,}7 \cdot 18{,}750 = 0{,}7307$ g	Le calcul réalisé à la calculatrice est le suivant : 13,7 : 18,75
Calcul de la quantité de matière de gaz : $\frac{15{,}284 \cdot 246 \cdot 10^{-2}}{62{,}364} = 0{,}6028$ mol	La valeur de la température n'est pas reprise dans le calcul. Le volume n'est pas converti correctement en litre. La pression n'est pas la pression partielle en gaz mais la pression exercée par la colonne d'eau

Tableau 30 : Exemples d'erreurs commises par les étudiants autres que liées à la précision des résultats

2.2. Catégorisation des erreurs commises

Les différents tableaux présents dans la suite de ce paragraphe reprennent, pour chaque opération du test, le nombre de chiffres significatifs de chacune des valeurs et/ou la précision du résultat tels que reportés par l'étudiant, le numéro de la (des) catégorie(s) d'erreur commise ainsi que le pourcentage d'étudiants ayant commis cette erreur dans les tests (Annexes 4, 12 et 16). De manière générale, si une valeur du calcul n'est pas reprise avec la précision adéquate mais qu'au final, le résultat comporte le nombre adéquat de chiffres significatifs, une erreur a été comptée. Les cas pour lesquels aucune erreur n'est commise sont repris en gras. Les mots apparaissant au niveau de la

catégorie d'erreur donnent une indication sur un autre type d'erreur commis par l'étudiant :

- « calculette » signifie que l'étudiant a reporté la valeur affichée par la calculatrice ;
- « constante » signifie que l'étudiant a rapporté une constante avec une précision moindre.

Des valeurs sont parfois reprises entre parenthèses. Ce sont les valeurs reportées par les étudiants ayant commis l'erreur décrite dans les cases du tableau.

Il existe encore d'autres types d'erreurs que celles qui sont reprises dans les tableaux dont il n'est pas fait mention dans ce travail car la fréquence de ces erreurs est très faible. Il est possible de croire que certains résultats reportés avec un grand nombre de chiffres ou une grande précision sont les valeurs affichées par la calculatrice. Nous essayons, autant que faire se peut, de faire appel aux catégories d'erreurs mentionnées lors des entretiens d'explicitation. Or, lors de ces entretiens, les étudiants n'ont pas fait mention de la calculatrice pour commenter ce type de résultat.

Chaque copie d'étudiant a été numérotée. L'annexe 4 reprend les tests des étudiants de 2016-2017, l'annexe 12 ceux des étudiants de l'année 2018-2019 ayant suivi le cours et l'annexe 16 ceux des étudiants de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours. Des tableaux reprenant les erreurs commises par les différents étudiants lors de chacune des opérations mathématiques effectuées sont présents en annexes 5, 13 et 17, respectivement.

La première opération effectuée par les étudiants est la multiplication. Elle permet d'obtenir la masse de magnésium :

$$m = 13{,}7\,.\,18{,}750 = 256{,}875 = 257\ mg$$

Le tableau 31 (page ci-après) reprend la façon dont les valeurs du calcul sont reportées par les étudiants, la ou les catégorie(s) d'erreur commise et les pourcentages d'étudiants faisant l'erreur décrite dans les tests.

De manière générale, les étudiants reportent la valeur de la longueur du ruban avec le nombre de chiffres significatifs tel que repris dans les données. Il arrive que ce ne soit pas le cas en ce qui concerne la valeur de la masse linéique reportée par certains étudiants avec trois ou quatre chiffres significatifs. Quand les étudiants reportent cette valeur avec quatre chiffres significatifs, ils considèrent que le « zéro » n'est pas significatif. Dans ce cas, les étudiants commettent une erreur de la troisième catégorie. Au niveau du résultat, en considérant que les données sont reprises adéquatement par les étudiants, les différentes possibilités d'erreurs reprises dans le tableau sont, respectivement, 256,9 mg ; 256,89 mg et 256,875 mg. Des valeurs identiques sont

obtenues lorsque les étudiants ne considèrent pas le « zéro » de la masse linéique comme significatif.

Longueur du ruban (cm)	***Masse linéique (mg.cm^{-1})***	***Réponse de l'étudiant***		***Pourcentage dans les tests (%)***
Nombre de C.S.	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Catégorie d'erreur***	
3	5	**3**	***/***	***/***
		4	1 (256,9)	20
		5	2	5,0
		6	1 & 2	4,7
	4	4	1 & 3	0,8
	3	4	1 & constante	1,4

Tableau 31 : Nombre de chiffres significatifs des valeurs reportées par les étudiants ainsi que la (les) catégorie(s) d'erreur commise lors de la multiplication

Dans ce calcul, la catégorie d'erreur la plus présente dans les copies des étudiants est la première : les étudiants utilisent la règle à appliquer lors d'opérations d'addition ou de soustraction.

La deuxième opération est une addition impliquant de transformer la température en kelvin :

$$T(K) = 17{,}8 + 273{,}15 = 290{,}95 = 291{,}0\ K$$

Les types d'erreurs commises ainsi que les pourcentages d'étudiants faisant l'erreur décrite dans les tests sont repris dans le tableau 32 (page ci-après).

Lorsqu'ils reportent les valeurs du calcul, il arrive que les étudiants écrivent le facteur permettant de transformer les degrés Celsius en kelvin avec trois chiffres significatifs, le même nombre que la valeur de la température. Ils arrondissent la constante à l'unité. S'ils respectent la règle à appliquer pour écrire le résultat de cette somme avec la précision adéquate, ils reportent la valeur avec une précision à l'unité. Etant donné que la valeur de la température intervient dans la détermination de la quantité de matière, la transcription du résultat de cette opération avec un nombre de chiffres significatifs réduit peut avoir un impact dessus.

Si le facteur de changement d'échelle est transcrit avec tous les chiffres prévus par convention, les étudiants commettant des erreurs vont soit écrire un résultat avec le même nombre de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le moins c'est-à-dire la température, soit avec la même précision que la valeur apparaissant comme la plus

précise c'est-à-dire le facteur. Ils font alors des erreurs qui appartiennent respectivement à la première et à la deuxième catégorie d'erreur. Dans le deuxième cas présenté dans le tableau, les étudiants arrondissent la valeur obtenue à 291 K. La réponse étant 291,0 K, il est également possible que les étudiants considèrent que le chiffre « zéro » ne soit pas significatif.

Température (°C)	***Facteur de changement d'échelle***	***Réponse de l'étudiant***		***Pourcentage dans les tests (%)***
Nombre de C.S.	***Nombre de C.S.***	***Précision***	***Catégorie d'erreur***	
3	5	**10^{-1}**	**/**	**/**
		1	1 (290)	6,6
			1 & 3 (291)	24
		10^{-2}	2	28
	3	10^{-1}	2 & constante	0,8

Tableau 32 : Précision des valeurs reportées par les étudiants ainsi que la (les) catégorie(s) d'erreur commise lors de l'addition

L'opération suivante est une division permettant d'obtenir la pression exercée par une colonne d'eau :

$$P_{colonne} = \frac{68}{13{,}6} = 5 = \ 5{,}0\ Torr$$

Les différentes erreurs rencontrées ainsi que les pourcentages d'étudiants les commettant sont repris dans le tableau 33.

Hauteur de la colonne d'eau (mm)	***Densité du mercure***	***Réponse de l'étudiant***		***Pourcentage dans les tests (%)***
Nombre de C.S.	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Catégorie d'erreur***	
2	3	**2**	**/**	**/**
		1	1 & 3 (5)	29
			1 & 2 (5.10^{-3})	1,4
		3	2	6,4

Tableau 33 : Nombre de chiffres significatifs des valeurs reportées par les étudiants ainsi que la (les) catégorie(s) d'erreur commise lors de la division

Sur l'opération de division, les étudiants ne font généralement pas d'erreur dans la transcription des valeurs dans le calcul. Lors de la transcription du résultat, certains étudiants ne reportent qu'un seul chiffre significatif. Dans ce cas, ils omettent de reporter un « zéro » ou considèrent que la valeur ne doit comporter aucune décimale, tout comme la hauteur de la colonne d'eau. Il est aussi possible qu'ils reprennent la valeur calculatrice étant donné qu'elle ne comporte pas un grand nombre de chiffres. D'autres étudiants peuvent aussi écrire 5,00 comme résultat. Ils estiment qu'il faut autant de chiffres significatifs que la valeur qui en comporte le plus c'est-à-dire la densité du mercure.
Sur cette opération de division, les erreurs les plus souvent commises par les étudiants sont l'utilisation de la règle inadéquate et la modification du sens du chiffre « zéro ».

L'opération suivante est une soustraction de différentes valeurs de pressions pour obtenir la pression partielle en gaz :

$$P_{H_2} = 748 - 5{,}0 - 15{,}284 = 727{,}716 = 728\,Torr$$

Le tableau 34 (page ci-après) reprend les catégories d'erreurs commises pour cette opération ainsi que les pourcentages d'étudiants faisant les erreurs décrites.
Dans le calcul de la pression partielle en gaz, la valeur de la pression exercée par la colonne d'eau calculée précédemment intervient. Les étudiants ayant reporté la valeur 5,00 dans le calcul précédent ont également tendance à reporter la valeur du résultat de cette opération avec un maximum de décimales. La valeur ayant un impact sur la précision du résultat est alors la tension de vapeur de l'eau. Le cas n'est donc pas différent de celui où les étudiants reportent la valeur du résultat avec six chiffres significatifs tout en présentant les valeurs du calcul avec une précision adéquate.
Toujours au niveau des valeurs reportées dans le calcul, il arrive que les étudiants arrondissent la tension de vapeur de l'eau pour qu'elle présente le même nombre de chiffres significatifs ou la même précision que la pression atmosphérique. C'est le même type d'erreur que lorsqu'ils arrondissent le facteur de changement d'échelle dans le calcul de la température.
Si la précision des valeurs à reporter dans le calcul est respectée, les erreurs reprises dans le tableau 34 correspondent respectivement aux valeurs suivantes : $7{,}3.10^2$ Torr ; 727,7 Torr ; 727, 72 Torr ; 727, 716 Torr.
Les autres cas présentés reprennent les mêmes types d'erreur sauf lorsque le résultat reporté par l'étudiant comporte une précision au dixième alors qu'aucune autre valeur reportée ne présente le même nombre de chiffres ou cette même précision. Comme présenté aux paragraphes 2.3 du chapitre 2 et 2.3.2 du chapitre 5, cette erreur provient d'une mauvaise compréhension du terme « décimale » repris dans la règle à appliquer.

L'étudiant considère qu'il s'agit uniquement de chiffre(s) après une virgule alors qu'il doit être compris comme le rang d'un chiffre écrit dans un système de numérotation en base dix. Il considère que la valeur comportant le minimum de décimales est celle qui en a une, la valeur précise à l'unité ne présentant pas de « décimale » à entendre comme chiffre après la virgule.

Pression atmosphérique (Torr)	***Tension de vapeur d'eau (Torr)***	***Pression de la colonne d'eau (Torr)***	***Réponse de l'étudiant***		***Pourcentage dans les tests (%)***
Nombre de C.S.	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Précision***	***Catégorie d'erreur***	
3	5	2	**1**	/	/
			10	1 (7,3.10²)	9,7
			10^{-1}	Min de décimales = 1 (5,0)	3,7
			10^{-2}	1 & 2	3,4
			10^{-3}	2	5,4
		1	10^{2}	1	1,4
			10^{-1}	?	1,1
			10^{-2}	1 & 2	2,8
			10^{-3}	2	6,5
		3	1	3	0,9
	2	1	1	Constante	0,9

Tableau 34 : Précision des valeurs reportées par les étudiants ainsi que la (les) catégorie(s) d'erreur commise lors de la soustraction

La dernière opération est un mélange de multiplication et de division permettant d'obtenir la quantité de matière de gaz produit :

$$n = \frac{728\,.\,0{,}246}{62{,}364\,.\,291{,}0} = 9{,}86608\ldots\ 10^{-3} = 9{,}87\,.\,10^{-3}\ mol$$

Toutes les erreurs commises par les étudiants ne se retrouvent pas dans le tableau 35 (page ci-après) car le nombre de cas rencontrés (plus de 50 sur 280 copies sans tenir

compte des valeurs reportées elles-mêmes) est très important. Cette variabilité des réponses des étudiants provient, en plus des erreurs citées précédemment :

- du nombre de valeurs impliquées dans le calcul ;
- des erreurs commises dans les calculs de la pression et de la température ;
- de la non-conversion du volume en litre.

Cette variabilité des résultats est la raison pour laquelle aucun pourcentage d'étudiants n'est repris dans ce tableau et qu'il est fait mention du nombre de chiffres significatifs en plus de la précision. De plus, si les étudiants ont commis une erreur dans une opération, il en est tenu compte par la suite pour éviter de la comptabiliser deux fois.

Volume (L)	***Température (K)***	***Constante des gaz parfaits (Torr.L.mol^{-1}.K^{-1})***	***Pression du gaz (Torr)***	***Réponse de l'étudiant***		
Nombre de C.S.	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Nombre de C.S.***	***Précision***	***Catégorie d'erreur***
3	4	5	3	**3**	**10^{-5}**	**/**
				1	10^{-2}	3
					10^{-3}	1 & 3
				2	10^{-3}	1 & 2
					10^{-4}	2 & 3
			2	1	10^{-2}	3
			1	1	1	3 (0)
			4	5	10^{-7}	2
				1	10^{-3}	2 & 3
			5	5	10^{-7}	2
				2	10^{-4}	2 & 3
			6	6	10^{-8}	2
		4	3	4	10^{-6}	2 & constante
	3	5	3	5	10^{-7}	2 & 3

Tableau 35 : Nombre de chiffres significatifs et précision des valeurs reportées par les étudiants ainsi que la (les) catégorie(s) d'erreur commise lors du mélange de multiplication et de division

Dans ce tableau 35, toutes les possibilités ne sont pas reprises. En effet, certains étudiants écrivent la valeur de la température avec cinq chiffres significatifs, la constante des gaz parfaits avec deux chiffres ou le volume avec quatre chiffres. Dans les copies des étudiants, ces valeurs ne permettent pas d'expliquer la précision du résultat qu'ils ont reporté. Ils se sont visiblement basés sur d'autres valeurs pour déterminer la précision du résultat. Ces cas ne sont donc pas repris dans le tableau.

Généralement, les étudiants écrivent le volume avec la précision adéquate. La température est reportée avec trois, quatre ou cinq chiffres significatifs suivant la valeur de la température calculée par l'étudiant. La constante des gaz parfaits est donnée avec cinq chiffres significatifs mais certains étudiants l'écrivent avec quatre chiffres. C'est probablement dû au cours de chimie donné durant la première partie de l'année et pour lequel ils avaient à retenir cette valeur avec quatre chiffres. La pression partielle en gaz prend généralement la valeur que les étudiants ont déterminée précédemment.

Les résultats de cette opération reportés par les étudiants vont présenter de un à six chiffres significatifs suivant les valeurs reprises dans le calcul et les erreurs commises. Les étudiants écrivent un résultat à cinq ou six chiffres significatifs lorsqu'ils considèrent que le résultat doit comporter autant de chiffres que la valeur qui en a le plus. Quand le résultat est présenté avec un ou deux chiffres significatifs, l'erreur (ou les erreurs) commise(s) concerne(nt) surtout la précision et la signification du « zéro ».

Les valeurs présentes dans le test effectué par les étudiants présentent généralement le même nombre de chiffres significatifs et la même précision que les valeurs obtenues lors du premier TP réalisé. L'un des objectifs de ce travail est de déterminer l'impact du cours mis en place sur la façon de reporter des résultats avec une précision adéquate. Les différents tableaux présentés sont nécessaires pour analyser les erreurs commises sans pour autant faire appel à des valeurs particulières. En effet, lors du TP, les étudiants obtiennent tous des valeurs différentes mais comparables. Les tableaux ne font plus appel aux valeurs en tant que telle mais à leur nombre de chiffres significatifs et/ou précision. Ils permettent d'effectuer une analyse basée uniquement sur ces dernières données et de déterminer, ainsi, s'il y a rémanence des erreurs.

3. Résultats

Tous les résultats sont présentés en distinguant les étudiants selon différents critères : l'année académique, la participation au cours en ligne et le type de production analysée. Au vu du nombre de données à présenter, il n'a pas toujours été possible de reprendre ces 3 critères dans les tableaux de résultats. Les différentes cohortes sont donc désignées par des lettres majuscules dont le détail est repris dans le tableau 36.

Lettre	Année académique	Cours en ligne	Production analysée	Nombre de productions
A	2016-2017	Non	Rapport	166
B			Test[13]	85
C	2018-2019	Non	Rapport	212
D		Oui		95
E		Non	Test	193
F		Oui		87

Tableau 36 : Répartition des étudiants

Les copies des rapports d'étudiants ainsi que les tableaux reprenant les catégories d'erreur commise par les étudiants pour chacune des opérations effectuées sont présents en annexe. Les annexes 2 à 5 reprennent les rapports et les tests des étudiants de 2016-2017 ainsi que les tableaux d'analyse de leurs productions, les annexes 10 à 13 les reprennent pour les étudiants de 2018-2019 ayant suivi le cours et les annexes 14 à 17 ces mêmes documents pour les étudiants de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours.

Pour rappel, les groupes d'analyse sont des étudiants inscrits en sciences pharmaceutiques et en sciences biomédicales. En 2018-2019, les nombres d'étudiants inscrits dans ces options étaient plus importants qu'en 2016-2017 à cause de contraintes institutionnelles. En 2017-2018, un examen d'entrée a été mis en place pour limiter le nombre d'étudiants s'inscrivant pour faire des études de médecine. Une partie des étudiants ne réussissant pas cet examen se sont inscrits en sciences pharmaceutiques ou en sciences biomédicales.

[13] Pour rappel, le test a été réalisé plusieurs mois après la rédaction des rapports

3.1. Impact du cours en ligne sur les erreurs commises lors de chacune des opérations

Le tableau 37 reprend les pourcentages d'étudiants de chaque cohorte commettant une ou plusieurs erreurs lors du report de résultats avec une précision adéquate en fonction de l'opération mathématique effectuée. Les données présentes dans ce tableau sont reprises sous forme de graphiques pour pouvoir être plus facilement comparées dans la suite de ce paragraphe.

	Addition (%)	**Soustra-ction (%)**	**Multipli-cation (%)**	**Division (%)**	**Multipli-cation & division (%)**	**Ensemble des opérations (%)**
A	56	23	20	37	35	77
B	62	35	32	51	50	85
C	56	33	27	48	49	83
D	32	16	21	23	34	64
E	70	54	42	39	31	91
F	41	27	36	32	34	77

Tableau 37 : Pourcentages d'étudiants commettant un ou plusieurs erreurs au niveau des opérations effectuées

3.1.1. Erreurs commises sur le long terme : comparaison des rapports et des tests

La figure 109 (page ci-après) présente les pourcentages d'étudiants de 2016-2017 commettant des erreurs dans le rapport et le test en fonction de l'opération effectuée. Les pourcentages d'étudiants commettant une ou plusieurs erreurs lors du report du résultat avec une précision adéquate dans le test (bleu) est plus important que dans le rapport (vert). Cette observation est valable quelle que soit l'opération. Il est cependant à noter que le test a été construit pour repérer les erreurs commises par les étudiants. Les valeurs sont donc choisies pour les faire ressortir. Il n'est donc pas étonnant que les pourcentages d'étudiants qui se trompent soient plus importants lors du test.

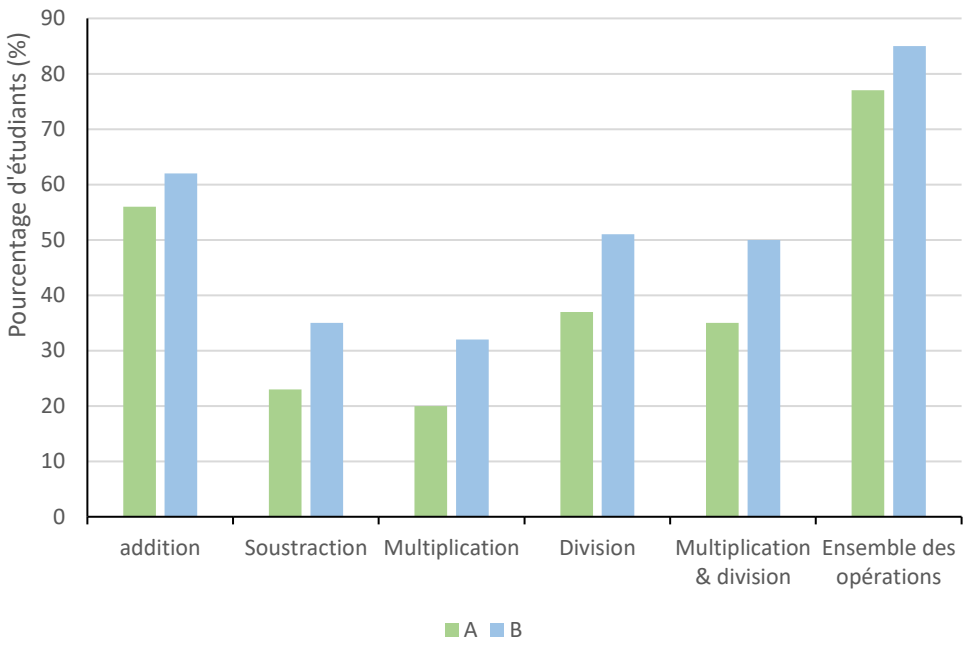


Figure 109 : Pourcentages d'étudiants de 2016-2017 commettant une ou plusieurs erreurs en fonction de l'opération effectuée dans le rapport et lors du test

La figure 110 présente les mêmes pourcentages que dans la figure précédente mais pour les étudiants de l'année 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours.

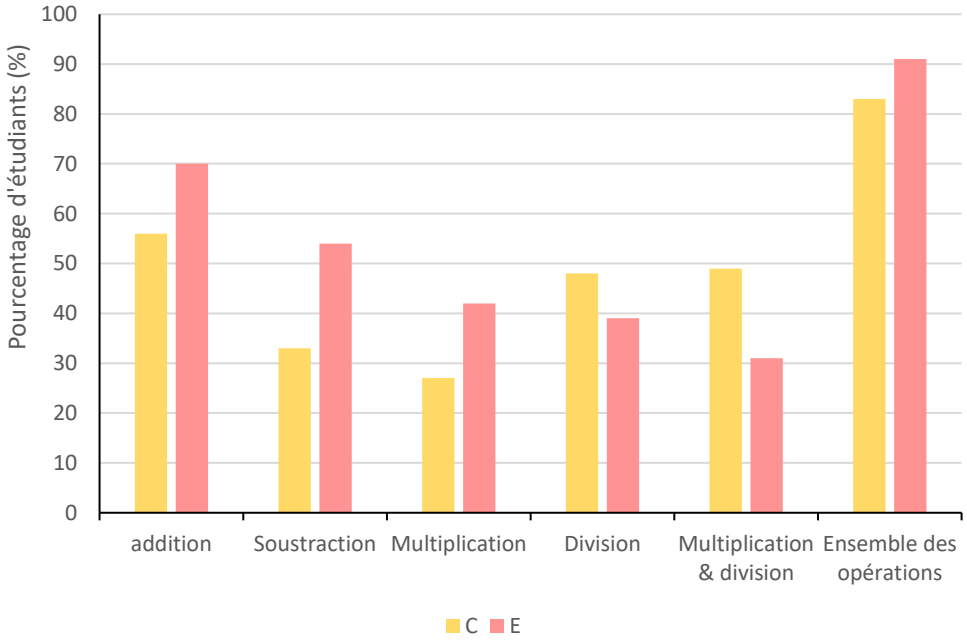


Figure 110 : Pourcentages d'étudiants de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours commettant une ou plusieurs erreurs en fonction de l'opération effectuée dans le rapport et lors du test

La même observation peut être faite sauf pour l'opération de division et celle qui implique un mélange de multiplication et de division. Malgré ces deux exceptions, cette augmentation de pourcentages est observable sur l'ensemble des opérations. Cette différence est probablement un impact de l'apprentissage. Le test est réalisé au début du premier TP de la deuxième partie de l'année académique. Les étudiants ont déjà eu plusieurs TP et ont eu l'occasion d'avoir des explications complémentaires données par les encadrants. Or, il a été demandé aux encadrants de visionner le cours en ligne. Il est donc possible que les encadrants se soient basés dessus pour donner leurs explications.

3.1.2. Impact direct du cours en ligne : analyse des rapports

Les résultats obtenus lors de l'analyse des rapports sont repris dans la figure 111. Elle permet de comparer les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs en 2016-2017 (vert), n'ayant pas suivi le cours en 2018-2019 (jaune) et ayant suivi le cours cette même année (orange).

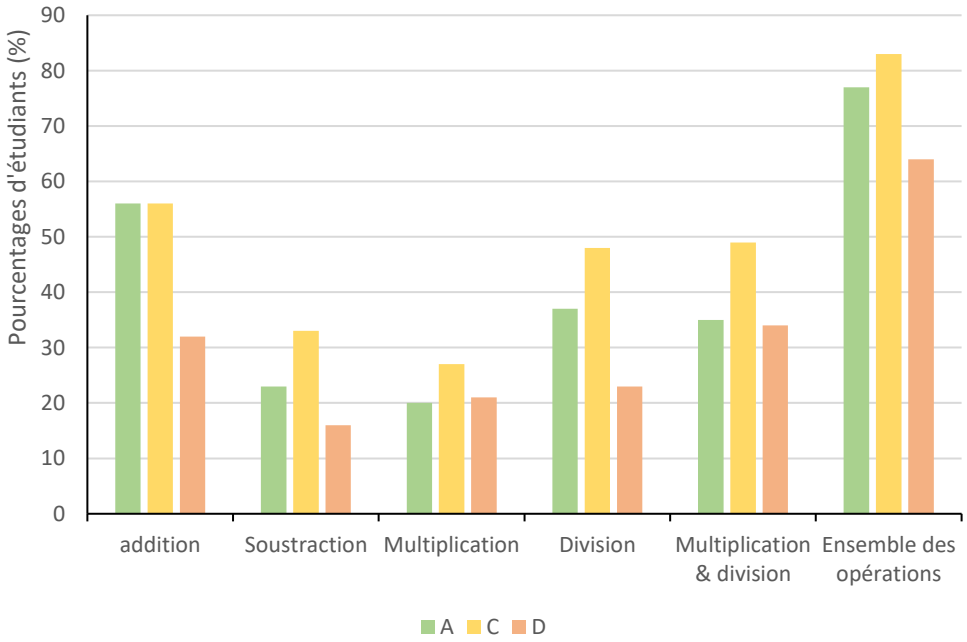


Figure 111 : Pourcentages d'étudiants commettant une ou plusieurs erreurs en fonction de l'opération effectuée dans le rapport

Les pourcentages d'étudiants de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours sont systématiquement plus élevés que ces mêmes pourcentages pour les étudiants de 2016-2017 sauf pour l'opération d'addition pour laquelle ces pourcentages sont identiques. Ces étudiants inscrits en 2018-2019 commettent probablement plus d'erreurs que leurs homologues en 2016-2017. Il est aussi possible que ce soit une question de motivation.

Les étudiants de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours sont peut-être moins impliqués dans leurs apprentissages. En 2016-2017, l'étude a été faite sur l'ensemble des étudiants.

Pour l'année 2018-2019, si les résultats des étudiants ayant participé au cours en ligne sont comparés à ceux des étudiants ne l'ayant pas fait, il est remarquable que le pourcentage de la première cohorte est systématiquement plus petit que celui de la seconde. Cela laisse supposer un impact du cours en ligne sur la compréhension qu'ont les étudiants de la manière de reporter des résultats avec une précision adéquate.

Des tests d'indépendance du khi-carré ont été effectués pour contrôler l'impact du cours en ligne lors du report de résultats des différentes opérations effectuées. L'objectif de ce test est de pouvoir rejeter une hypothèse nulle, ce qui est le cas lorsque la probabilité d'obtenir les mêmes valeurs que celles observées dans des conditions « normales » est inférieure à 0,05. L'hypothèse nulle est la suivante : le cours en ligne n'a pas d'impact sur le nombre d'étudiants commettant des erreurs. Si la probabilité, appelée p-valeur, est supérieure à 0,05, l'hypothèse nulle ne pourra pas être rejetée. Cela ne veut pas dire que le cours en ligne n'a pas d'impact mais qu'il est possible qu'il n'ait pas d'impact. La p-valeur correspondant à l'impact du cours en fonction des opérations effectuées est de 0,38 sur base de l'analyse des rapports. Il est donc plus que probable que les variations observées sur la figure 111 ne soit pas exclusivement dues au cours en ligne.

3.1.3. Impact du cours en ligne à long terme : analyse des tests

Les résultats obtenus lors de l'analyse des tests sont repris dans la figure 112 (page ci-après). Tout comme la figure précédente, elle permet de comparer les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs en 2016-2017 (bleu), n'ayant pas suivi le cours en 2018-2019 (rouge) et ayant suivi le cours cette même année (violet).

Si les résultats du test passé en 2016-2017 sont comparés à ceux de 2018-2019, une observation quelques peu similaire à celle qui a déjà été rapportée pour l'analyse des rapports peut être faite : le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs en 2016-2017 est inférieur à celui de 2018-2019 pour les étudiants n'ayant pas suivi le cours en ligne sur la plupart des opérations. Les seules exceptions sont les opérations de division et le mélange de multiplication et de division pour lesquelles ce pourcentage est supérieur en 2016-2017. Comme mentionné précédemment, cette différence peut être expliquée par l'impact que l'encadrant peut avoir sur les étudiants dont il a la charge.

Si les pourcentages d'étudiants des deux cohortes de 2018-2019 sont comparés, il apparaît que les pourcentages d'étudiants ayant suivi le cours sont systématiquement moins importants que ces mêmes pourcentages pour les étudiants n'ayant pas suivi le

cours. Cela laisse de nouveau supposer que le cours a un impact. Ce dernier est cependant moins flagrant en ce qui concerne les multiplications et divisions. Sur ces opérations, l'impact du cours semble s'estomper. Ce résultat était attendu car les étudiants visionnent les vidéos et font les exercices associés en un ou deux jours avant la première activité de laboratoire et ne retournent généralement pas consulter le cours par la suite.

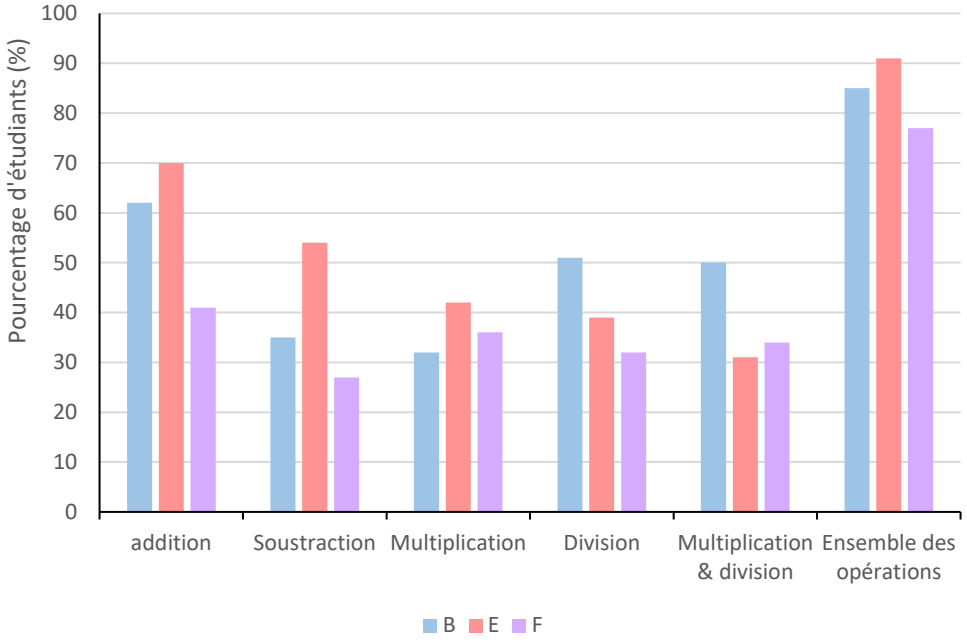


Figure 112 : Pourcentages d'étudiants commettant une ou plusieurs erreurs en fonction de l'opération effectuée dans le test

On observe donc globalement une diminution du pourcentage d'étudiants qui commettent des erreurs suite au cours mais d'autres facteurs ne sont pas à négliger tels que la motivation des étudiants et l'impact de l'encadrant.

3.1.4. Conclusion

Lors de cette première partie d'analyse, nous avons pu constater que le cours en ligne n'était pas le seul à avoir un impact sur la manière dont les étudiants reportent le résultat de différentes opérations mathématiques avec une précision adéquate. De plus, il semble ne pas engendrer d'acquis à long terme, du moins lorsque l'analyse porte sur les calculs à effectuer.

3.2. Impact du cours en ligne sur les types d'erreurs commises

Le cours a été construit sur base des erreurs commises par les étudiants. La suite de l'analyse traite donc de l'impact du cours sur les types d'erreurs commises suite à sa mise en œuvre. Les différentes erreurs sont classées dans les catégories présentées au paragraphe 2.5 des analyses préalables. Le tableau 38 présente les pourcentages d'étudiants de chaque cohorte utilisant une règle inadéquate (catégorie 1), redéfinissant les règles par leur opposé (catégorie 2) ou modifiant le sens du chiffre « zéro » (catégorie 3). Pour rappel, le test n'incluant pas de nombres purs dans les opérations à effectuer, aucune donnée ne concerne la quatrième catégorie d'erreurs, le traitement de nombres purs comme des valeurs expérimentales.

	Catégorie 1	**Catégorie 2**	**Catégorie 3**
A	43	60	32
B	75	47	60
C	61	69	37
D	51	41	21
E	82	46	61
F	63	29	49

Tableau 38 : Pourcentages d'étudiants commettant un ou plusieurs erreurs au niveau de chacune des catégories d'erreurs

Tout comme dans le paragraphe précédent, les données reprises dans le tableau supra ont été représentées sous forme de graphiques en bâtonnets pour faciliter la comparaison.

3.2.1. Types d'erreurs commises sur le long terme : comparaison des rapports et des tests

La figure 113 (page ci-après) présente les pourcentages d'étudiants commettant une ou plusieurs erreurs en fonction des catégories définies précédemment. Le code couleur employé est le même que dans le paragraphe précédent :

- résultats issus de l'analyse des rapports des étudiants inscrits en 2016-2017 (vert) ;
- résultats issus de l'analyse des tests des étudiants inscrits en 2016-2017 (bleu) ;
- résultats issus de l'analyse des rapports des étudiants inscrits en 2018-2019 et n'ayant pas suivi le cours (jaune) ;

- résultats issus de l'analyse des tests des étudiants inscrits en 2018-2019 et n'ayant pas suivi le cours (rouge).

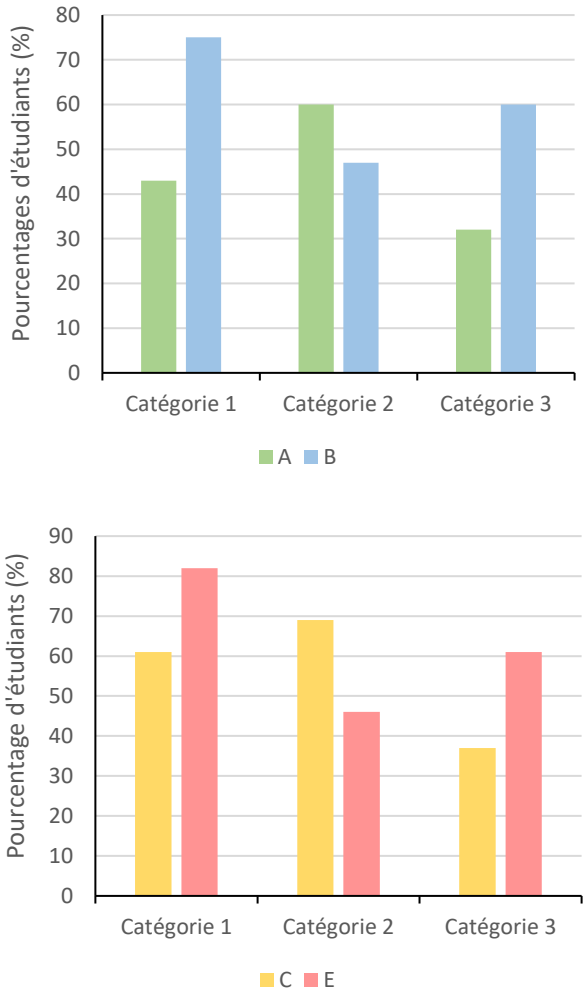


Figure 113 : Pourcentages d'étudiants n'ayant pas suivi le cours commettant un ou plusieurs erreurs en fonction de la catégorie d'erreur commise dans les rapports et les tests

Dans les rapports, l'erreur commise par le plus grand pourcentage d'étudiants est la redéfinition des règles par leur opposé (Catégorie 2) c'est-à-dire garder un maximum de chiffres significatifs et de décimales pour avoir la plus grande précision possible. En début de cursus, beaucoup d'étudiants croient en l'existence d'une « vraie » valeur qu'il est possible d'obtenir en étant très précis et exact. Ce raisonnement est appelé raisonnement « point » par Evangelinos, Psillos, & Valassiades (2002). Ce type d'erreur est moins fréquent lors du test. Il est possible que la croyance que les valeurs expérimentales, pour être exactes, doivent être les plus précises possible s'estompe au cours des différentes activités expérimentales prévues dans le programme des cours. Les étudiants se rendent compte que les instruments de mesure ont une précision limitée

et que cela limite la précision de leurs résultats. Ils n'ont donc plus autant tendance à reporter leurs résultats avec un maximum de chiffres significatifs ou de décimales. Cette erreur est la seule qui soit commise par moins d'étudiants au cours du temps. Il semblerait qu'un apprentissage sur le long terme soit nécessaire pour que les étudiants acquièrent une raisonnement « intervalle », c'est-à-dire qu'ils comprennent qu'il faut associer un intervalle de confiance à toute mesure.

Au niveau des tests, l'erreur commise par le plus grand pourcentage d'étudiants est l'utilisation d'une règle inadéquate (Catégorie 1). Les étudiants ont tendance à employer la règle d'application pour les opérations d'addition et de soustraction lors d'opérations de multiplication et de division et vice versa. Ils intervertissent les règles, n'utilisent qu'une seule règle quelle que soit l'opération ou utilisent les règles de manière aléatoire. Ce type d'erreur est commis par un plus grand pourcentage d'étudiants lors du test que lors de la rédaction des rapports. Les étudiants ne sont pas ou plus conscients du lien entre les règles et l'incertitude des mesures effectuées. Ils appliquent les règles rappelées par l'encadrant au début du premier TP pour lequel ils ont rédigé le rapport servant aux analyses et les oublient par la suite.

En ce qui concerne la troisième catégorie d'erreur, la modification du sens du chiffre « zéro », il s'avère qu'un plus grand pourcentage d'étudiants la commettent lors du test que lors du rapport. Cette augmentation est attendue car plusieurs valeurs choisies pour faire le test impliquent de connaître la signification qu'un expérimentateur donne au chiffre « zéro » lorsque ce dernier termine un nombre. Dans les rapports, la plupart des étudiants n'y sont pas forcément confrontés.

Les trois observations précédentes sont valables quelle que soit l'année mais aussi que les étudiants aient ou non suivi le cours. En effet, le graphique qui serait obtenu en reportant les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs lors de la rédaction du rapport et du test et ayant suivi le cours en fonction des catégories d'erreur ressemble aux deux graphes présentés à la figure 113.

3.2.2. Impact direct du cours en ligne : analyse des rapports

L'impact du cours sur les types d'erreurs commises par les étudiants lors de la rédaction du rapport peut être déterminé en comparant les pourcentages d'étudiants commettant une ou plusieurs erreurs en fonction des catégories (Figure 114, page ci-après).

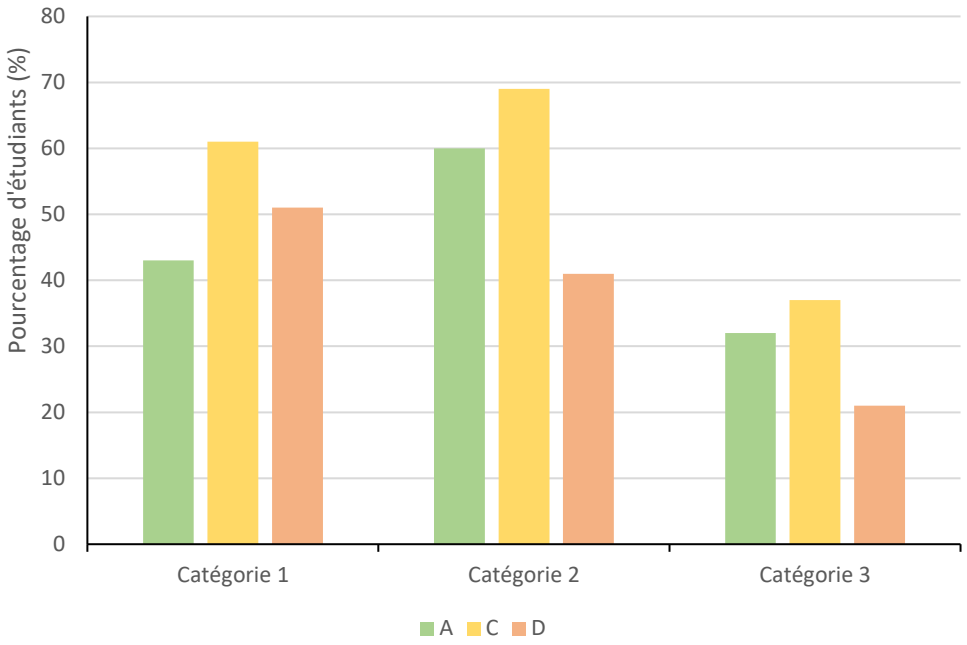


Figure 114 : Pourcentages d'étudiants commettant un ou plusieurs erreurs en fonction de la catégorie d'erreur commise dans les rapports

Une première approche confirme une observation faite précédemment. Les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs est moins important en 2016-2017 qu'en 2018-2019 pour les étudiants n'ayant pas suivi le cours. La même observation peut être faite si la cohorte d'étudiants ayant suivi le cours est comparée à celle des étudiants ne l'ayant pas réalisé. Les hypothèses posées pour expliquer ces différences sont identiques à celles qui ont été faites dans le paragraphe 3.1.2.

Ce graphique laisse supposer que le cours a effectivement un impact sur les types d'erreurs commises car les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs est moins important lorsque les étudiants ont suivi le cours. C'est ce qui est observable pour les catégories 2 et 3. Ce n'est pas le cas pour la catégorie 1. Pour cette première catégorie d'erreur, le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs est plus petit en 2016-2017 que pour les deux autres cohortes. Le pourcentage d'étudiants utilisant une règle inadéquate est plus important pour les étudiants ayant suivi le cours que pour les étudiants de 2016-2017. Le cours n'aurait donc pas l'effet escompté.

Un test d'indépendance du khi-carré a été effectué pour contrôler l'impact du cours en ligne sur les erreurs commises lors du report de résultats des différentes opérations effectuées. L'hypothèse nulle est la suivante : le cours en ligne n'a pas d'impact sur les erreurs commises par les étudiants. Les p-valeurs correspondant à l'impact du cours sur les erreurs commises par les étudiants des différentes cohortes en fonction des opérations effectuées sont reprises dans le tableau 39 (page ci-après).

	Addition	***Soustra-ction***	***Multipli-cation***	***Division***	***Multipli-cation et division***	***Ensemble des opérations***
Rapport	0,015	0,45	0,47	0,52	0,88	0,25

Tableau 39 : p-valeurs d'un test statistique vérifiant la dépendance entre la participation à un cours en ligne traitant du report de résultats avec une précision adéquate et les erreurs commises sur les différentes opérations mathématiques effectuées

Les différences entre les cohortes d'étudiants n'ayant pas participé au cours en ligne et celle qui y a participé n'est pas suffisamment importante pour être significative. Le cours en ligne n'est probablement pas le seul facteur pouvant avoir un impact sur les types d'erreur commises par les étudiants lorsqu'ils reportent des résultats expérimentaux. L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée si ce n'est pour l'opération d'addition. Ceci peut s'expliquer par l'exemple choisi dans le but d'illustrer la règle à appliquer pour reporter le résultat d'une addition ou d'une soustraction avec une précision adéquate. En effet, cet exemple est exactement celui auquel ils sont confrontés lors de la rédaction du rapport : la transformation d'une température en kelvin. Il est donc plus que probable que les étudiants ayant participé au cours en ligne se souviennent de cet exemple en particulier. Les autres exemples utilisés dans les vidéos ne correspondent pas aux calculs à effectuer dans le rapport. Les étudiants sont donc amenés à appliquer la règle à un nouvel exemple, ce qui demande plus d'effort.

3.2.3. Impact du cours en ligne à long terme : analyse des tests

La figure 115 (page ci-après) montre les pourcentages d'étudiants des deux cohortes de l'année 2018-2019 commettant des erreurs sur base des résultats obtenus lors du test. Les pourcentages correspondant à la cohorte de 2016-2017 n'ont pas été repris car, conformément à ce qui est observé à la figure 113, elle se comporte de manière similaire à celle de 2018-2019 n'ayant pas suivi le cours en ligne.

Lors du test, les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs sont moins importants pour la cohorte d'étudiants ayant suivi le cours que pour l'autre groupe. Les différences de pourcentages sont cependant moins marquées que sur l'analyse des rapports. Elles vont de 16 à 28 % lors de l'analyse des rapports contre 12 à 19 % lors de l'analyse des tests. Comme attendu, l'impact du cours semble s'estomper.

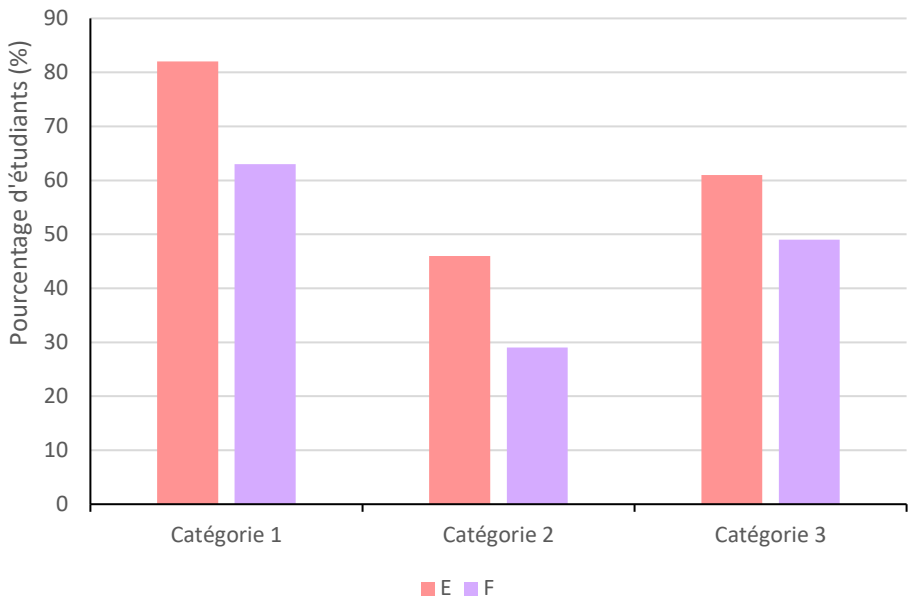


Figure 115 : Pourcentages d'étudiants de 2018-2019 commettant un ou plusieurs erreurs en fonction de la catégorie d'erreur commise dans les tests

De nouveau, un test d'indépendance du khi-carré a été effectué pour contrôler l'impact du cours en ligne sur les erreurs commises lors du report de résultats des différentes opérations effectuées. L'hypothèse nulle est identique à celle du paragraphe 3.2.1 précédent. Les p-valeurs correspondant à l'impact du cours sur les erreurs commises par les étudiants des différentes cohortes en fonction des opérations effectuées sont reprises dans le tableau 40.

	Addition	***Soustra-ction***	***Multipli-cation***	***Division***	***Multipli-cation et division***	***Ensemble des opérations***
Test	0,68	0,71	0,93	0,87	0,60	0,90

Tableau 40 : p-valeurs d'un test statistique vérifiant la dépendance entre la participation à un cours en ligne traitant du report de résultats avec une précision adéquate et les erreurs commises sur les différentes opérations mathématiques effectuées

Comme attendu, l'impact du cours en ligne ne se fait plus sentir. C'est également le cas, contrairement à ce qui a été observé dans les rapports, pour l'opération d'addition.

3.2.4. Conclusion

Les étudiants font des apprentissages à l'occasion des différentes activités expérimentales. Lors de cette analyse, nous avons pu remarquer qu'ils avaient tendance à commettre moins d'erreurs de la deuxième catégorie qu'ils aient suivi le cours en ligne

ou pas. Ce résultat laisse à penser qu'au fur et à mesure de leur avancée dans le cursus, les étudiants adoptent un raisonnement « intervalle », considèrent de plus en plus que leurs mesures sont des gammes de valeurs et pas des mesures uniques.

L'impact du cours en ligne ne se fait sentir que lorsque le calcul à effectuer correspond à celui présenté dans le cours. Sur les autres opérations, il semblerait, comme précédemment, que le cours en ligne ne soit pas l'unique source pouvant expliquer les acquis des étudiants. Cette observation est d'autant plus évidente en ce qui concerne la première catégorie d'erreur. Le cours en ligne n'a pas l'effet escompté. Il ne permet apparemment pas aux étudiants de donner du sens aux règles utilisées.

3.3. Impact du cours en ligne sur la fréquence des erreurs commises dans chaque catégorie

Ne pouvant pas conclure à un impact du cours en ligne sur les erreurs des étudiants lors du report de résultats expérimentaux avec une précision adéquate, nous nous sommes intéressés à la fréquence des erreurs dans chaque catégorie pour les trois cohortes d'étudiants.

Dans la suite des analyses, les erreurs commises par les étudiants dans chaque catégorie ont été dénombrées. Les tableaux 41, 42 et 43 reprennent les pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 ou 5 erreurs de chacune des catégories sur l'ensemble des opérations.

3.3.1. Catégorie 1 : Utilisation de la règle inadéquate

Le tableau 41 présente ces pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 erreurs dans la catégorie qui concerne l'emploi de la règle inadéquate.

	Nombre d'erreurs commises sur l'ensemble des opérations			
	1	**2**	**3**	**4**
A	29	11	2	1
B	40	21	12	1
C	38	17	4	1
D	36	3	2	0
E	36	37	8	2
F	36	15	11	1

Tableau 41 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 erreurs de la première catégorie

La figure 116 représente les pourcentages d'étudiants de 2016-2017 commettant de 1 à 4 erreurs lors des rapports et lors des tests (respectivement en vert et bleu) ainsi que ces mêmes pourcentages pour les étudiants de 2018-2019 ayant suivi le cours (respectivement en orange et en violet).

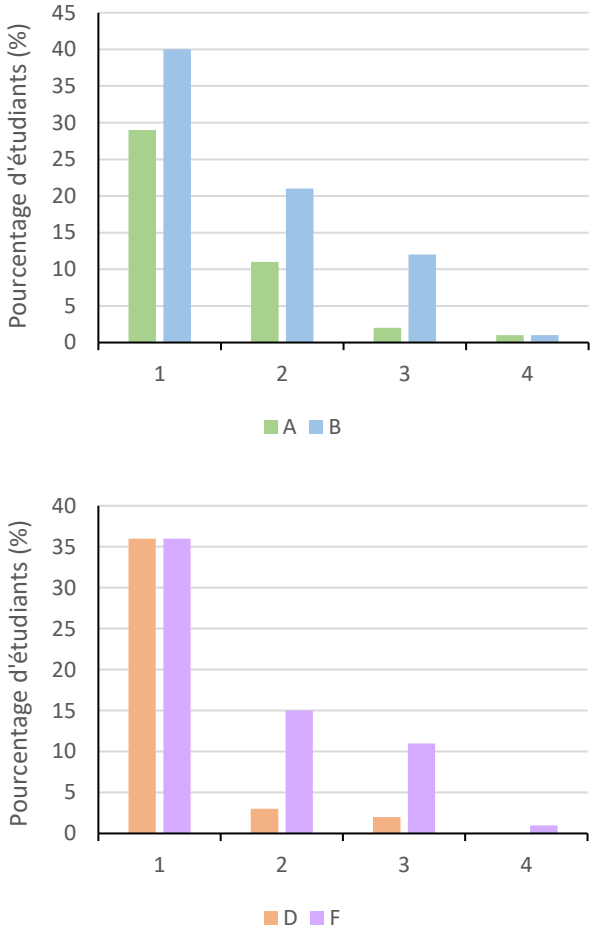


Figure 116 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 erreurs de la première catégorie dans les rapports et les tests

Quelle que soit l'année, le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs est moins important lors de la rédaction du rapport que lors du test quel que soit le nombre d'erreurs. Cette observation rejoint ce qui a été rapporté dans le paragraphe 3.1.

En 2016-2017, les étudiants ont utilisé jusqu'à quatre fois une règle inadéquate que ce soit dans leur rapport ou dans le test. C'est également le cas des étudiants de 2018-2019 ayant effectué le cours lors du test. Lors de la rédaction des rapports, cette cohorte d'étudiants commet nettement moins d'erreurs que lors du test. De manière générale, ces derniers étudiants utilisent une seule fois une règle inadéquate sur les opérations analysées dans les rapports. Le maximum d'erreurs commises dans cette catégorie est

de trois. Ces résultats renforcent l'idée que l'impact du cours en ligne diminue au cours du temps, les étudiants n'utilisant l'outil qu'une seule fois avant le premier TP.
La figure 117 permet de comparer les pourcentages d'étudiants des trois cohortes commettant de 1 à 4 erreurs dans les rapports.

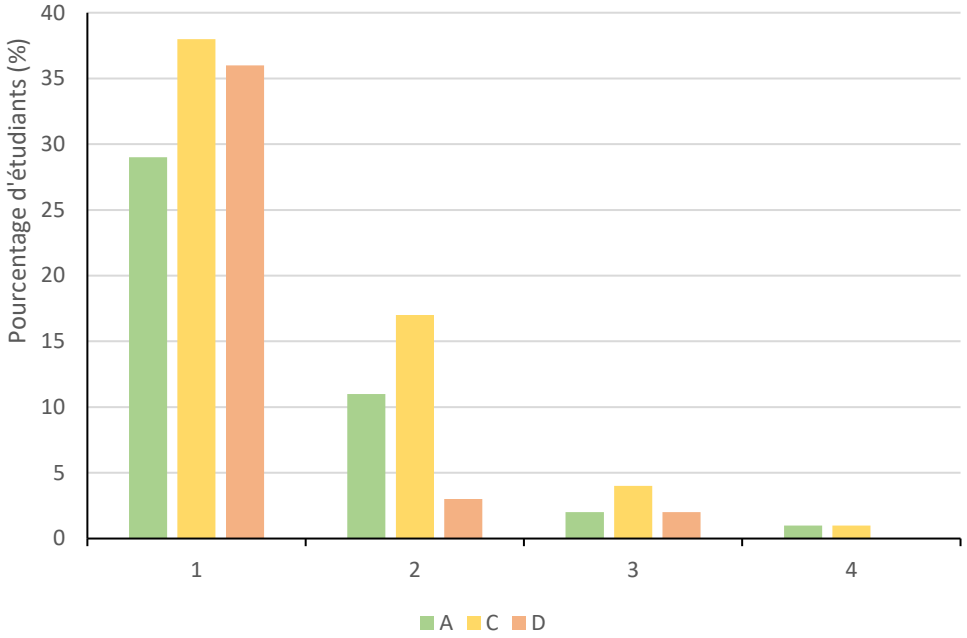


Figure 117 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 erreurs de la première catégorie dans les rapports

Un grand nombre d'étudiants commettent une erreur de la catégorie 1. Cette partie du graphique est très semblable à la partie de la figure 114 traitant de cette catégorie d'erreur. Les différences apparaissent surtout dans la suite du graphique. Il est remarquable de constater qu'un très faible pourcentage des étudiants ayant suivi le cours font deux erreurs en comparaison des deux autres cohortes. Le cours limiterait donc non pas le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs mais le nombre d'erreurs sur une même copie. Les étudiants, lorsqu'ils sont en laboratoire, sont amenés à penser à d'autres éléments en plus de la transcription de leurs résultats avec une précision adéquate. Ils ne font donc pas systématiquement attention à la précision lors de chaque opération à effectuer.
La figure 118 (page ci-après) représente les mêmes pourcentages que la figure précédente pour les deux cohortes d'étudiants de 2018-2019 lors du test.

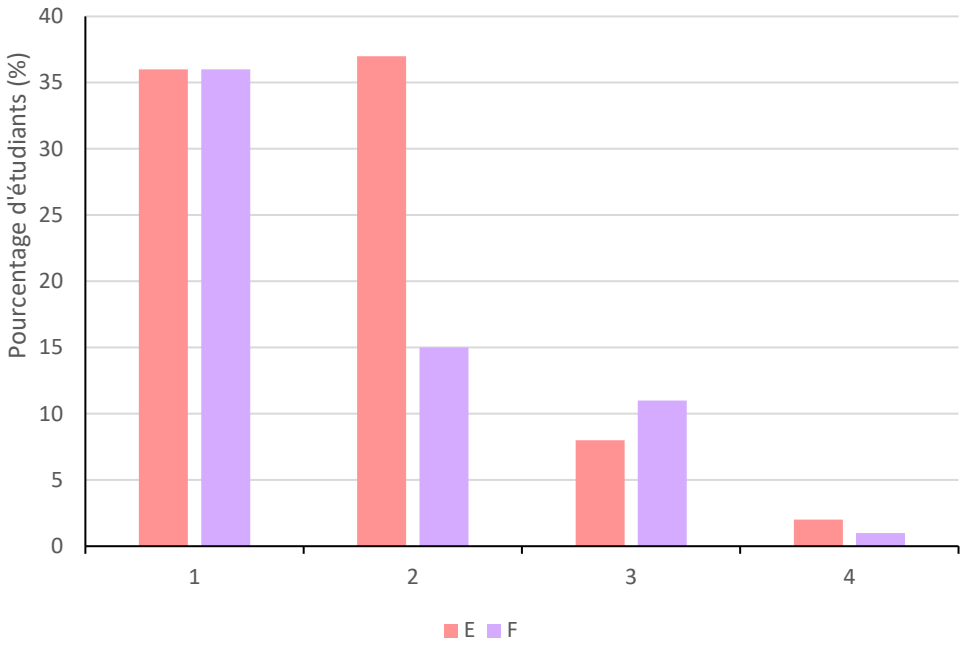


Figure 118 : Pourcentages d'étudiants de 2018-2019 commettant de 1 à 4 erreurs de la première catégorie dans les tests

Même si, de manière globale, le nombre d'erreurs commises est plus important lors du test que lors du rapport et que l'impact du cours se fait moins sentir, l'observation faite supra est également valable lors des tests. Le pourcentage d'étudiants commettant deux erreurs est nettement inférieur lorsque les étudiants ont suivi le cours comparé à ceux qui ne l'ont pas fait. Les différences de pourcentages visibles dans la suite du graphique ne sont pas des plus significatives et ne permettent en tout cas pas de compenser la différence mentionnée précédemment.

3.3.2. Catégorie 2 : Redéfinition des règles par leur opposé

Le tableau 42 (page ci-après) présente les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs classées dans la deuxième catégorie. Ils redéfinissent les règles par leur opposé.

En ce qui concerne les pourcentages d'étudiants n'ayant pas suivi le cours (2016-2017 et 2018-2019) et commettant des erreurs, les observations rejoignent celles qui ont été faites dans le paragraphe 3.2.1. Les étudiants commettent moins d'erreurs de ce type au fur et à mesure de leur avancée dans le cursus.

	Nombre d'erreurs commises sur l'ensemble des opérations				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A	30	17	9	4	1
B	21	15	6	1	4
C	33	16	11	7	1
D	26	9	2	3	0
E	16	16	9	4	1
F	14	8	8	0	0

Tableau 42 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 5 erreurs de la deuxième catégorie

Une observation différente peut être faite lors d'une comparaison entre les pourcentages d'étudiants ayant suivi le cours lors de la rédaction du rapport (orange) et ces mêmes pourcentages lors du test (violet) (Figure 119).

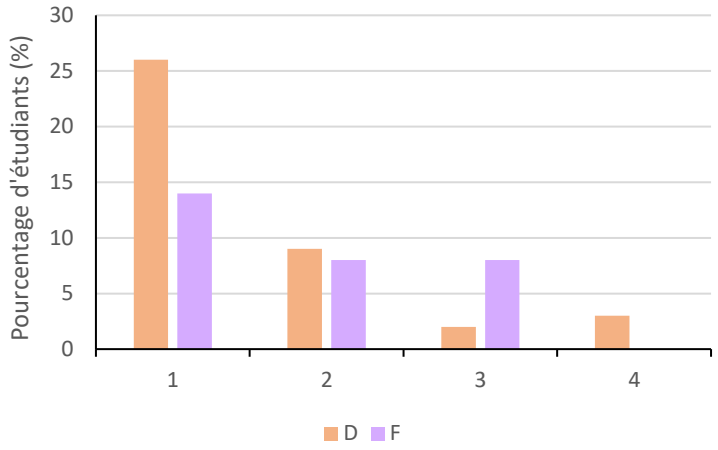


Figure 119 : Pourcentages d'étudiants de 2018-2019 ayant suivi le cours commettant de 1 à 4 erreurs de la deuxième catégorie dans le rapport et le test

Alors que les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs de cette catégorie diminue généralement lors du test, le graphe de cette figure 119 montre une augmentation du pourcentage d'étudiants commettant trois erreurs de ce type et une différence négligeable du pourcentage d'étudiants commettant deux erreurs. Le pourcentage global d'étudiants commettant ce type d'erreur diminue (de 41 à 29 %) comme repris dans le tableau 38 mais la tendance est à l'augmentation du nombre de fois que ce type d'erreur est commise. Les étudiants semblent systématiser le raisonnement engendrant ce type d'erreur. Certains étudiants vont effectivement faire évoluer leur façon de penser d'un raisonnement « point » à un raisonnement « intervalle » tandis que d'autres vont apparemment renforcer ce raisonnement « point ».

L'impact du cours se faisant surtout sentir sur les résultats issus de l'analyse des rapports, seuls ces derniers sont discutés dans la suite de ce travail.
La figure 120 représente les pourcentages d'étudiants des trois cohortes commettant de 1 à 5 erreurs de redéfinition des règles par leur opposé lors de la rédaction des rapports.

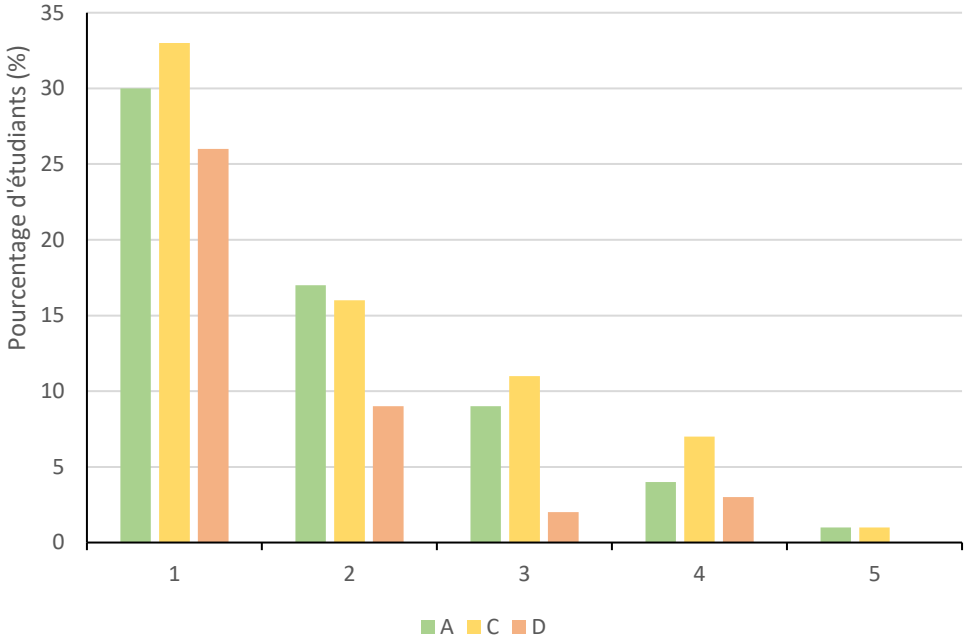


Figure 120 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 5 erreurs de la deuxième catégorie dans le rapport

Les pourcentages d'étudiants transcrivant une ou des valeurs avec un nombre de chiffres significatifs ou de décimales maximum sont systématiquement plus élevés pour les cohortes n'ayant pas suivi le cours. Les étudiants l'ayant effectué commettent moins d'erreurs de ce type.

3.3.3. Catégorie 3 : Modification du sens du chiffre « zéro »

Le tableau 43 (page ci-après) présente les pourcentages d'étudiants commettant des erreurs classées dans la troisième catégorie. Ils modifient la signification du chiffre « zéro ».
L'abaissement de l'impact du cours sur les erreurs commises au cours du temps est encore observable dans ce tableau. Les pourcentages d'étudiants modifiant la signification du chiffre « zéro » sont pratiquement toujours plus élevés lors des tests.

	Nombre d'erreurs commises sur l'ensemble des opérations				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
A	26	6	0	0	0
B	40	15	2	0	1
C	31	5	0	1	0
D	20	1	0	0	0
E	49	10	1	1	0
F	39	10	0	0	0

Tableau 43 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 5 erreurs de la troisième catégorie

La figure 121 présente les pourcentages d'étudiants des trois cohortes commettant de 1 à 4 erreurs lors de la rédaction des rapports.

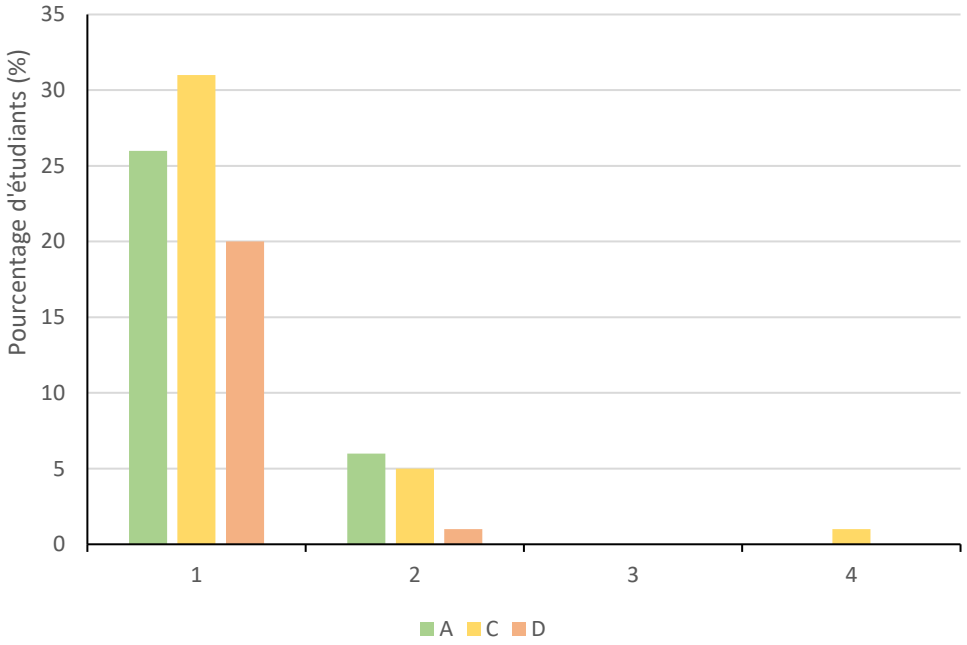


Figure 121 : Pourcentages d'étudiants commettant de 1 à 4 erreurs de la troisième catégorie lors de la rédaction des rapports

Comme déjà renseigné dans le paragraphe 3.2.2 de ce chapitre, il y a moins d'étudiants ayant suivi le cours commettant ce type d'erreur en termes de pourcentage. Les résultats de la figure supra confirment cette observation et permet d'ajouter que les étudiants ne commettent généralement pas plus de 2 erreurs de ce type qu'ils aient eu accès au cours ou pas. Les étudiants ayant suivi le cours sont moins nombreux à modifier la signification du chiffre « zéro ».

3.3.4. Conclusion

Dans cette troisième et dernière partie des résultats, nous regardons à la fréquence des types d'erreurs commises.
Concernant la première catégorie d'erreurs, le cours en ligne semble ne pas avoir l'effet escompté sur le nombre d'étudiants commettant des erreurs mais sur la fréquence de ces erreurs.
Sur la seconde catégorie d'erreurs, la tendance est à une augmentation du nombre de fois que l'erreur est commise. La diminution du nombre d'étudiants commettant cette erreur au cours du temps fait penser qu'ils acquièrent un raisonnement « intervalle ». Pourtant, il apparaît que certains de ces étudiants commettent plus souvent cette erreur. Cela laisse à penser qu'une partie des étudiants acquièrent un raisonnement « intervalle » tandis que d'autres renforcent le raisonnement « point ».
L'impact du cours en ligne est le moins visible sur la fréquence des erreurs de la troisième catégorie commises. Il n'y a pas de différence remarquable entre les cohortes ayant eu accès au cours en ligne et les autres.

3.4. Conclusion : impact du cours en ligne

Le cours a été construit sur base des erreurs commises par les étudiants et identifiées au travers de l'analyse de rapports, de tests et d'entretiens d'explicitation. Il s'avère que les étudiants ne réalisent qu'une seule fois le cours juste avant le premier TP et ne le consultent plus par la suite.
Les productions des étudiants sont analysées sur base des opérations effectuées et de catégories d'erreurs dans lesquelles sont classées ces erreurs. L'impact du cours sur les erreurs commises par les étudiants s'observe surtout lors de la rédaction des rapports c'est-à-dire à court terme. De manière générale, les étudiants ayant suivi le cours :

- sont moins nombreux à commettre des erreurs ;
- commettent moins d'erreurs.

que les étudiants n'ayant pas accédé au cours.
Les tests statistiques révèlent cependant que ces résultats ne peuvent pas n'être attribués qu'au cours. L'implication des étudiants dans leurs apprentissages ainsi que l'enseignement donné par les encadrants ont aussi probablement un impact sur la manière dont les étudiants acquièrent les règles permettant de transcrire leurs résultats expérimentaux avec une précision adéquate et les appliquent.
Les différentes analyses effectuées ne permettent pas de corroborer ou d'infirmer les hypothèses posées lors de l'analyse a priori. Cependant, nous pouvons remarquer que,

de manière générale, le cours a un impact positif sur le nombre d’étudiants commettant des erreurs ainsi que sur les types et le nombre d’erreurs commises. Même si le cours n’est pas le seul élément dont il faut tenir compte lorsque les étudiants sont amenés à reporter leurs résultats avec une précision adéquate, il s’avère qu’il propose une aide non négligeable.

Chapitre 8
Validation

Dans ce chapitre, les résultats sont confrontés aux hypothèses posées lors de l'analyse a priori. Lors de la construction du cours, trois hypothèses ont été posées pour tenter d'expliquer les erreurs commises par les étudiants lors du report de résultats avec une précision adéquate. Chacune d'entre elles est liée à un type d'erreur.

La première de ces hypothèses concerne l'utilisation inadéquate des règles. Nous pensons qu'elle est due à un manque de sens de ces règles. Une différence entre les cohortes d'étudiants n'apparaît que lors du test sur la fréquence des erreurs susmentionnées et pas sur le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs. Les étudiants ayant participé au cours en ligne font moins d'erreurs que ceux qui n'y ont pas participé. Cela est également valable sur le long terme. Il semble donc que le dispositif mis en place ne permette pas de donner du sens aux règles employées ou que l'erreur commise ne soit pas due à un manque de signification des règles tout au moins pas uniquement. Ces résultats pourraient également remettre en question la légitimité du savoir enseigné : les règles sont-elles une approche adéquate lors de l'apprentissage de l'écriture de résultats avec une précision adéquate ? Ne sont-elles pas trop éloignées du savoir savant au point que les étudiants ne voient pas, dès lors, l'intérêt de leur emploi ?

La deuxième hypothèse est la peur de perdre en précision que peuvent avoir les étudiants et qui est, selon nous, l'une des causes de la redéfinition des règles par leur opposé. Cette idée qu'ont les étudiants ne semble s'estomper, elle aussi, que sur le long terme, les résultats du test montrant une diminution du pourcentage d'étudiants commettant cette erreur qu'ils aient suivi le cours en ligne ou pas. Comme pour la première catégorie d'erreurs, une différence entre les cohortes s'observe lors de l'étude de la fréquence des erreurs de cette deuxième catégorie. A court terme, les étudiants ayant suivi le cours en ligne font moins d'erreurs. Sur le long terme, la tendance est à l'augmentation de la fréquence de ces erreurs chez ces mêmes étudiants. La différence entre les cohortes tend à s'estomper. Le cours en ligne pourrait apparemment permettre aux étudiants de comprendre que leurs résultats ont une précision limitée et qu'il soit donc nécessaire de les écrire avec un minimum de chiffres significatifs ou de décimales. Cependant, un rappel est indispensable pour que l'effet soit pérenne.

La troisième hypothèse posée porte sur la raison pour laquelle les étudiants font des erreurs lors du report de résultats impliquant des « zéros ». Nous pensons que cela est dû à une différence de signification du chiffre « zéro » entre sciences expérimentales et mathématiques. Les observations faites ne permettent ni de corroborer, ni d'infirmer notre hypothèse. Dans ce cas-ci, il apparaît que le dispositif mis en place puisse aider car les pourcentages d'étudiants se trompant et les fréquences d'erreurs restent plus basses lorsque les étudiants ont suivi le cours en ligne. Cependant, il est nécessaire de rappeler

aux étudiants les paramètres permettant de dire si un zéro est significatif ou pas lors du report de résultats expérimentaux car, quelle que soit la cohorte, les pourcentages d'étudiants commettant cette erreur tendent à augmenter.

De manière générale, le cours seul n'a pas beaucoup d'impact sur l'apprentissage et l'application de cette matière par les étudiants. Il serait intéressant de regarder à la manière dont les étudiants le perçoivent, à leur approche, aux buts qu'ils poursuivent, … mais aussi à l'influence des encadrants, des activités expérimentales mises en place tant en chimie qu'en physique, biologie, … Le cours tel qu'il a été pensé est un outil qui doit être intégré dans une structure plus importante, dans un programme concernant la précision des résultats.

Chapitre 9
Analyse des protocoles de laboratoire rédigés par les étudiants

Lors des activités expérimentales, les étudiants ont généralement accès à un protocole expérimental plus ou moins détaillé. Ce protocole est donc un outil d'enseignement et, éventuellement, d'apprentissage. Lors de l'acquisition de technique de laboratoire, il est préférable que ce protocole soit l'objet d'un travail préalablement à la séance de laboratoire pour éviter que les étudiants ne fassent que le suivre à l'image d'une recette de cuisine. En effet, selon Séré (2002), les étudiants auraient alors tendance à croire que l'importance de la séance réside dans l'obtention de données et pas dans l'acquisition de procédures.

Dans le cadre de cette recherche, les étudiants ont été amenés à rédiger leur propre protocole de deux techniques de base en chimie, la dilution et le titrage, à l'aide d'outils présentés en annexe 18. Ce travail leur a été demandé comme préparation à la séance de TP 4. Pour rappel, ces étudiants débutent des études dans le domaine de la chimie. Ils n'ont, pour la plupart, pas ou très peu d'expérience de laboratoire en sortant de l'enseignement secondaire. Il est donc plus que probable qu'ils n'aient pratiquement jamais été confrontés à un protocole. Ils ne savent dès lors pas exactement ce qu'il est censé contenir, la notion de protocole en tant que telle n'étant par ailleurs pas abordée en secondaire. La liberté qui leur est laissée permet justement de s'intéresser à la nature des éléments que les étudiants incluent dans leurs écrits ainsi qu'au degré de détail de ces écrits. Les analyses sont effectuées en posant l'hypothèse que les étudiants n'écrivent que les éléments dont ils pensent avoir besoin. En conséquence, ce qui n'est pas décrit est ce que l'étudiant considère connaître. Partant de cette idée, il a été demandé aux étudiants de rédiger une seconde fois ces mêmes protocoles un peu plus tard dans l'année scolaire, à l'occasion de deux autres séances de laboratoire, les TP 6 et 9, chacun impliquant l'une des deux techniques de laboratoire susmentionnées. L'étude de ces protocoles sur base des mêmes grilles d'analyse donne une idée de l'évolution en cours d'année.

Ce chapitre va donc traiter des trois premières questions de recherche portant sur les acquis techniques des étudiants et dont les sujets sont :

- la nature des éléments présents dans les protocoles rédigés par les étudiants ;
- le degré de détail de ces protocoles ;
- l'évolution de la nature des éléments présents et du degré de détail en cours d'année.

1. Contenu des protocoles

Les protocoles rédigés par les étudiants à l'occasion du TP 4, du TP 6 et du TP d'intégration se trouvent respectivement en annexes 20, 21 et 22.

Certaines productions sont éliminées de l'analyse soit parce qu'elles ne présentent pas de description de la tâche à effectuer et ne peuvent donc pas pu être incluses dans l'analyse praxéologique, soit parce qu'elles reprennent des actes ne permettant pas de mener à bien l'activité. Il est alors difficile d'attribuer les gestes techniques décrits à une rubrique de la structure hiérarchique de l'activité. Les critères d'évaluation proposés par Girault et al. (2012) ont permis d'éliminer les productions ne se prêtant pas à l'une des analyses. En tout, 36 modes opératoires sur un total de 320 ont été éliminés. Les protocoles éliminés :

- ne décrivent pas une dilution, sont inexistants (10/36). Lors du TP 4, dix étudiants n'ont pas écrit le mode opératoire de la dilution ;
- ne permettent pas d'atteindre l'objectif du TP, ils manquent de pertinence (23/36). Les modes opératoires décrivant les dilutions portent les numéros 39, 82, 83, 195 à 199, 234 à 237 et ceux qui décrivent les titrages les numéros 35, 36, 38 à 42, ,84, 119, 122, 161 ;
- sont incomplets, ne tiennent pas compte des contraintes matérielles, … ils ne sont dès lors pas exécutables (14/36). Les modes opératoires décrivant les dilutions portent les numéros 40, 42, 83, 196, 197, 235, 236 et ceux qui décrivent les titrages les numéros 37, 38, 85, 120 à 122, 161 ;
- ne sont constitués que de calculs et de théorie ; ils ne sont donc pas communicables (5/36). Les modes opératoires décrivant les dilutions portent les numéros 195, 234, 237 et ceux qui décrivent les titrages les numéros 119, 120.

Les productions des étudiants se différencient tout d'abord par leur longueur. Certains protocoles ne comptent que trois à quatre lignes tandis que d'autres comptent jusqu'à deux ou trois pages, parfois rédigées à l'aide d'un traitement de texte.
Ils se différencient également par leur contenu. Quelques étudiants incluent des schémas ou des images d'une partie de la manipulation à effectuer. Certains étudiants ne vont inclure que des éléments d'ordre techniques, des gestes à réaliser tandis que d'autres vont inclure dans leurs protocoles des éléments théoriques tels que des formules ou des définitions ou encore les raisons pour lesquelles ils effectuent les gestes.

Les protocoles présentent donc tous des dissemblances mais pas de caractéristiques permettant de distinguer les étudiants ayant déjà une expérience en laboratoire de ceux qui n'en ont pas. L'hétérogénéité du public n'apparaît donc pas dans les résultats. Cependant, des similitudes de formulation, de présentation, etc. ont tout de même été constatées dans les travaux. Il est manifeste qu'ils ont travaillé en groupe ou qu'il y a eu des échanges lors de la rédaction du travail.

Nous n'avons trouvé, dans les productions étudiantes, aucune information de nature technique ou technologique non exposée dans les outils. La plupart des étudiants reprennent des items des fiches techniques textuellement ou légèrement modifiés et/ou transcrivent certaines parties des vidéos en gestes techniques. Ces outils ne présentant que des procédures de référence, les étudiants les adaptent au contexte de l'expérience. L'impact des outils est donc évident.

Des éléments de théorie, non repris dans les outils, sont cependant mentionnés par de rares étudiants. Ils proviennent d'autres sources telles que le cours, des livres de référence, d'autres personnes, ...

2. Analyse de la nature des éléments présents dans les protocoles expérimentaux

Le tableau 44 (page ci-après) reprend les pourcentages d'étudiants incluant, dans leurs protocoles, la tâche à effectuer, une description de la technique à employer, des éléments de technologie et/ou de la théorie ainsi que le nombre de travaux analysés pour chacune des activités expérimentales. Ce nombre de travaux correspond au nombre d'étudiants dont les productions ont été retenues. Pour rappel, l'analyse a été réalisée à l'aide d'une grille décrivant les différents éléments de la praxéologie dont un exemple appliqué aux outils à disposition des étudiants est repris au paragraphe 2.2.2 du chapitre 4.

Malgré le faible nombre d'étudiants, les données sont présentées en pourcentages pour des raisons de facilité lors de la comparaison.

	TP 4 : Acide-base		***TP 6 : Solubilité***	***TP 9 : Intégration***
	Dilution	***Titrage***	***Titrage***	***Dilution***
Tâche	74 %	58 %	56 %	58 %
Technique	100 %	100 %	99 %	100 %
Technologie	35 %	69 %	45 %	23 %
Théorie	0 %	16 %	17 %	7 %
Nombre de protocoles	69	74	71	67

Tableau 44 : Pourcentages d'étudiants incluant les différents éléments d'une praxéologie dans leurs protocoles

2.1. Analyse praxéologique

La première fois qu'ils doivent rédiger un protocole, seuls 5 % des étudiants ne mentionnent que les gestes techniques à effectuer. D'autres éléments se retrouvent dans les protocoles comme des schémas, de la théorie, … La seconde fois, la plupart rédigent un protocole nettement plus court, moins détaillé. Ils ne rédigent plus toutes les étapes et/ou regroupent différents items en un seul. Ils s'affranchissent des outils, s'approprient la procédure. Quelques étudiants reprennent leurs précédents écrits et ne font que transformer de minimes extraits pour correspondre à la manipulation à effectuer (changement des réactifs, de l'indicateur, des volumes, …).

Le tableau 44 montre que toutes les composantes de la praxéologie se retrouvent dans les protocoles à une exception près. Aucun étudiant n'inclut d'éléments théoriques la première fois qu'ils rédigent le protocole d'une dilution. Dans le cadre du TP 4, les étudiants ont été amenés à calculer la concentration de la solution-mère et à déterminer le facteur de dilution de la solution diluée. Il est possible que cette absence d'éléments théoriques soit la conséquence du travail qu'ils devaient effectuer au préalable. Les éléments théoriques sont, de leur point de vue, déjà présents dans les calculs effectués. En ce qui concerne la tâche, au moins un étudiant sur deux l'explicite en mentionnant le ou les objectifs au début de la procédure ou la décrit sous forme d'action dans un ou plusieurs titres. Cette dernière pratique implique un début de structuration du travail à réaliser lors du TP. Ce début de structuration se remarque aussi sur quelques protocoles incluant des schémas ou des dessins du montage à réaliser. En incluant ces schémas et dessins, les étudiants transcrivent tout ou une partie de leur texte sous une autre forme.

La composante technique se retrouve dans la presque totalité des protocoles analysés. En effet, un mode opératoire est une suite de gestes à effectuer. Les étudiants prennent pour exemple les procédures fournies lors des trois premières séances de laboratoire. Un seul étudiant n'a pas repris d'éléments techniques dans le mode opératoire de l'un des titrages. Il n'a en fait que cité la tâche à réaliser sans la décrire. Lors de la rédaction du premier mode opératoire, la plupart des étudiants prennent conscience de l'importance de la technicité, y compris ceux qui n'ont jamais manipulé durant leurs études secondaires. Cette partie technique est bien entendu plus importante dans certaines productions et moins dans d'autres.

Les composantes technologique et théorique sont aussi présentes dans les protocoles expérimentaux alors qu'elles ne font pas partie de la praxis mais du logos. Il semblerait que certains étudiants trouvent nécessaire de justifier les techniques par écrit. La présence d'éléments du logos dans un mode opératoire peut être expliquée par l'inexpérience des étudiants. Comme mentionné précédemment, le public de primo-arrivants est très hétérogène, tant au niveau des acquis théoriques que pratiques. La plupart de ces étudiants n'ont eu que fort peu l'occasion de manipuler en laboratoire. Ils n'ont dès lors pratiquement aucune connaissance nécessaire pour mener à bien une activité expérimentale. La première fois qu'ils exécutent une dilution et un titrage, les étudiants n'ont pas accès à un mode opératoire prédéfini. Ils ressentent alors le besoin de visualiser, de comprendre ce qu'ils font et pourquoi ils le font c'est-à-dire de faire des liens entre le logos et la praxis, conformément à ce que mentionne Keys (1999) dans son article.

Plus particulièrement, la composante théorique, quand elle est présente, est souvent utilisée pour :

- donner l'objectif de la manipulation et/ou expliquer comment les calculs doivent être effectués (Figure 122).

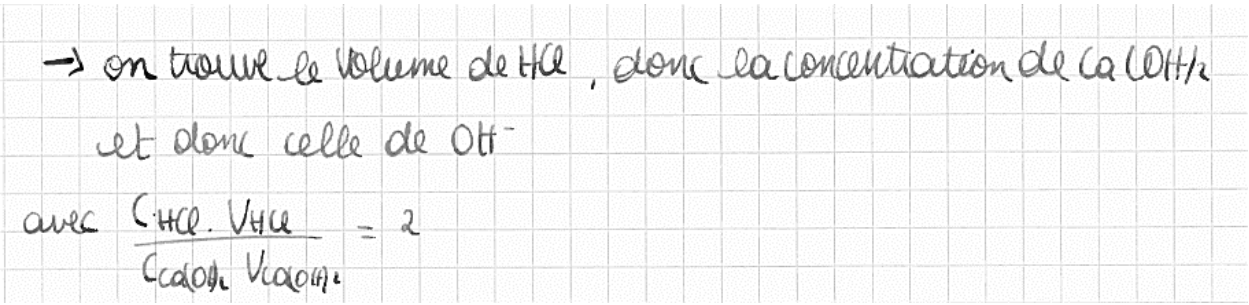
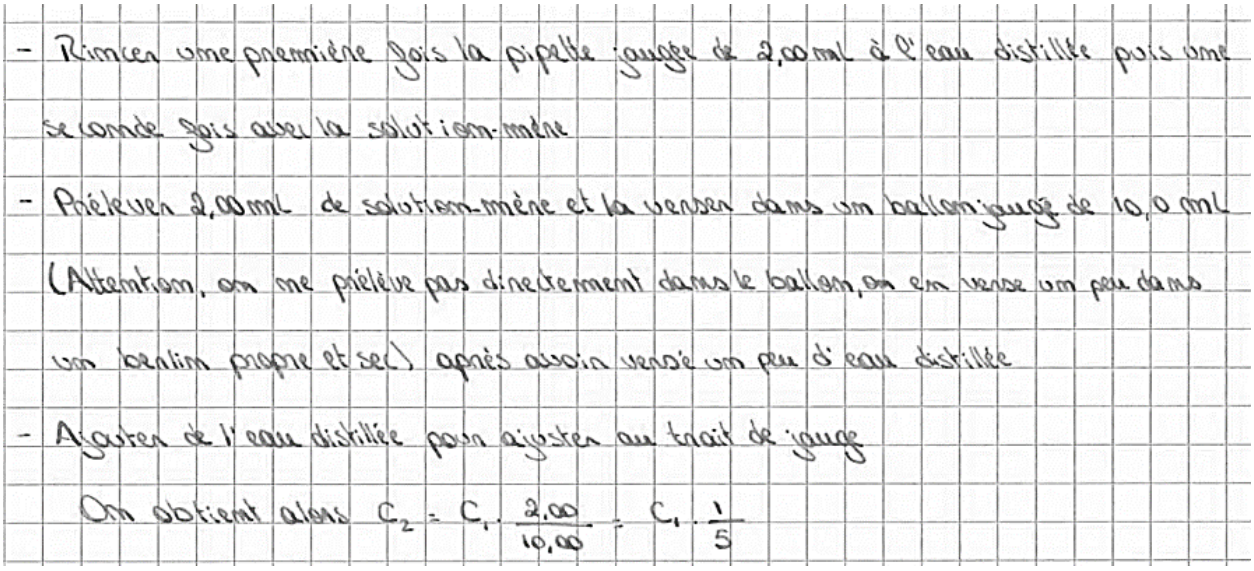


Figure 122 : Extrait du protocole de titrage d'un étudiant de l'année 2016-2017 (Annexe 20, n° 101)

- justifier le choix du volume des pièces de verrerie (Figure 123) ;


- Rincer une première fois la pipette jaugée de 2,00 mL à l'eau distillée puis une seconde fois avec la solution-mère
- Prélever 2,00 mL de solution-mère et la verser dans un ballon jaugé de 10,0 mL (Attention, on ne prélève pas directement dans le ballon, on en verse un peu dans un bécher propre et sec) après avoir versé un peu d'eau distillée
- Ajouter de l'eau distillée pour ajuster au trait de jauge

On obtient alors $C_2 = C_1 \cdot \frac{2,00}{10,00} = C_1 \cdot \frac{1}{5}$

Figure 123 : Extrait du protocole de dilution d'un étudiant de l'année 2017-2018 (Annexe 22, n° 210)

Une comparaison entre les pourcentages d'étudiants fait apparaître une différence entre la rédaction des protocoles de dilution et de titrage. Le pourcentage d'étudiants incluant des éléments de technologie et de théorie dans le mode opératoire d'une dilution est nettement inférieur à ce même pourcentage dans le cas du titrage. Cette dernière technique de laboratoire est plus riche en actions et peut engendrer une surcharge cognitive que les étudiants allègent par la rédaction d'un item dans leur protocole. Sur base des arbres des tâches, un expert de la discipline exécute, lorsqu'il fait un titrage, une quinzaine d'actions. Lorsqu'il réalise une dilution, il en effectue huit. L'importance des liens à effectuer entre connaissances procédurales et conceptuelles se fait donc plus sentir lors du titrage. Il y a plus de possibilités d'inclure des éléments de technologie et, par conséquent, de théorie lors de la rédaction du protocole d'un titrage. Le type de technique de laboratoire peut donc aussi avoir une influence sur la présence d'éléments du logos.

2.2. Evolution au cours de l'année académique

Le tableau 44 montre aussi une évolution des protocoles durant l'année. Dans les procédures décrivant la dilution, il y a peu de changements si ce n'est au niveau de la tâche et de la technologie. Les pourcentages d'étudiants diminuent de 74 à 58 % pour la tâche et de 35 à 23 % pour la technologie. Lors du TP 9, la tâche est définie dans les consignes. Beaucoup d'étudiants ne l'ont donc pas explicitée.

La diminution du pourcentage d'étudiants intégrant une partie technologique dans leur protocole s'observe aussi dans le cas du titrage. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette observation. L'une d'entre elles met en avant l'inexpérience des étudiants. Comme mentionné précédemment, la première fois qu'ils exécutent une dilution et/ou un titrage, ils mettent un grand nombre d'informations pour divers motifs dont le besoin de comprendre ce qu'ils font et la raison pour laquelle ils le font c'est-à-dire de faire des liens entre le logos et la praxis. La seconde fois qu'il leur est demandé de rédiger un mode opératoire de ces deux techniques de laboratoire, ils n'écrivent plus autant d'éléments de technologie, laissant supposer qu'ils n'en ressentent plus la nécessité et/ou qu'il y a eu apprentissage. La seconde explication à cette diminution du pourcentage d'étudiants incluant des éléments de technologie dans les modes opératoires n'est valable que pour le titrage et se rapporte à la technique de laboratoire elle-même. Les mesures sont répétées au moins trois fois pour des raisons d'exactitude. C'est donc aussi le cas des étapes de rinçage, de prélèvement, … à effectuer pour le mener à bien. Cette répétition peut être à l'origine d'une meilleure mémorisation des gestes et des raisons pour lesquelles ils sont effectués. Lors d'une dilution, par contre, les différentes manipulations ne se font qu'une seule fois, ce qui peut expliquer la diminution moins importante des pourcentages d'étudiants insérant des éléments de technologie dans leur protocole.

Cette diminution des éléments de logos peut aussi avoir un lien avec la définition d'un protocole. Normalement, un protocole expérimental ne comporte que les actes nécessaires pour effectuer la manipulation, la praxis. Il n'est donc pas étonnant que, durant la seconde moitié de l'année, les étudiants aient tendance à ne mentionner que les gestes à exécuter.

3. Analyse du degré de détail des protocoles expérimentaux

Les arbres des tâches ont été construits sur base du modèle T4TEL et de la structure hiérarchique de l'activité pour analyser la praxis. Ils vont également servir à comparer l'activité réalisée par les étudiants en laboratoire à l'activité « experte » (reprise dans les arbres des tâches) ainsi qu'à leurs écrits. Pour chaque case, les pourcentages d'étudiants reprenant, dans leurs protocoles, le geste qui y est mentionné a été déterminé. Pour des raisons de lisibilité et de facilité lors de la comparaison, les pourcentages d'étudiants reprenant chaque item ont été catégorisés. Les catégories permettent de distinguer les actes repris par :

- très peu d'étudiants (moins de 25 %) ;

- moins de la moitié des étudiants (26 à 50 %) ;
- plus de la moitié des étudiants (51 à 75 %) ;
- une grande majorité des étudiants (76 à 100 %).

Une dernière catégorie (0 à 5 %) permet de mettre l'accent sur les items qui ne sont pas ou rarement énoncés par les étudiants.

Certaines opérations ne pouvant pas être distinguées de l'action correspondante ont été barrées.

Les figures 124 et 125 (pages 268 – 269) présentent le résultat de cette catégorisation pour chaque item des arbres des tâches pour le TP 4.

Les figures 126 et 127 (pages 270 – 271) reprennent les catégories de pourcentages d'étudiants incluant, dans leurs modes opératoires décrivant la dilution du TP 9 et le titrage du TP 6, les items des arbres des tâches.

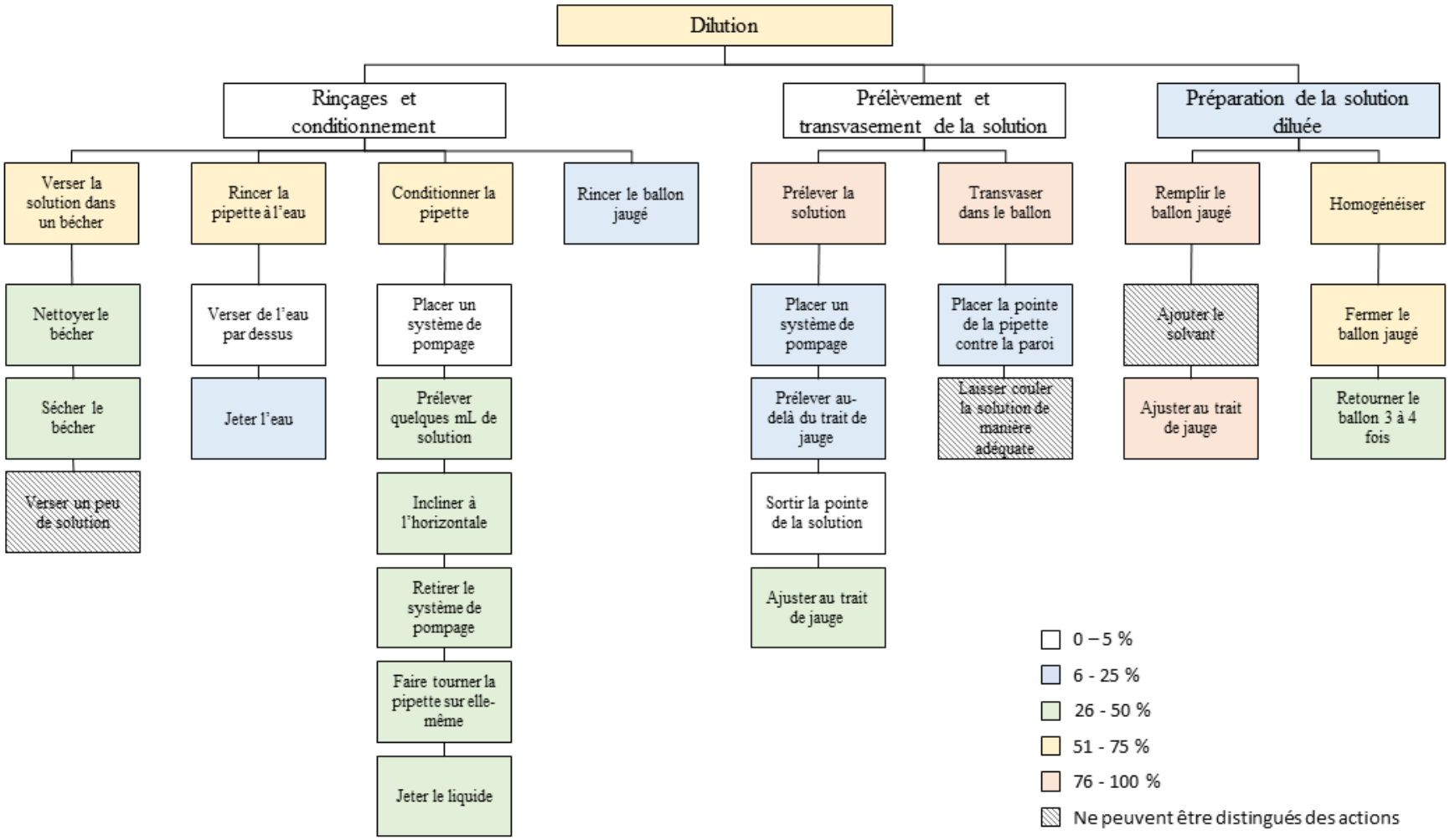


Figure 124 : Catégories de pourcentages d'étudiants incluant les différents gestes dans le protocole impliquant une dilution au TP 4 (Acide-base)

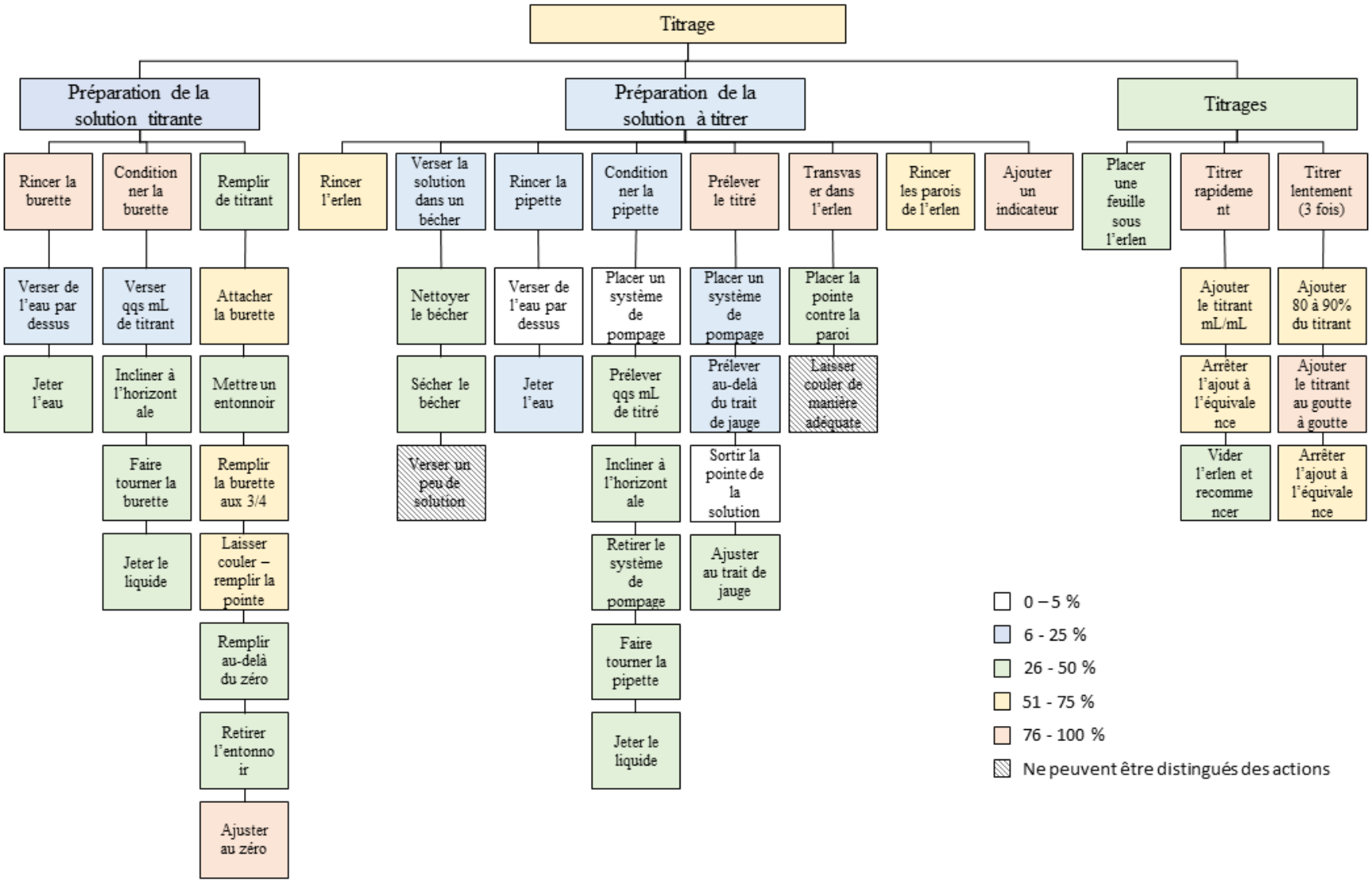


Figure 125 : Catégories de pourcentages d'étudiants incluant les différents gestes dans le protocole impliquant un titrage au TP 4 (Acide-base)

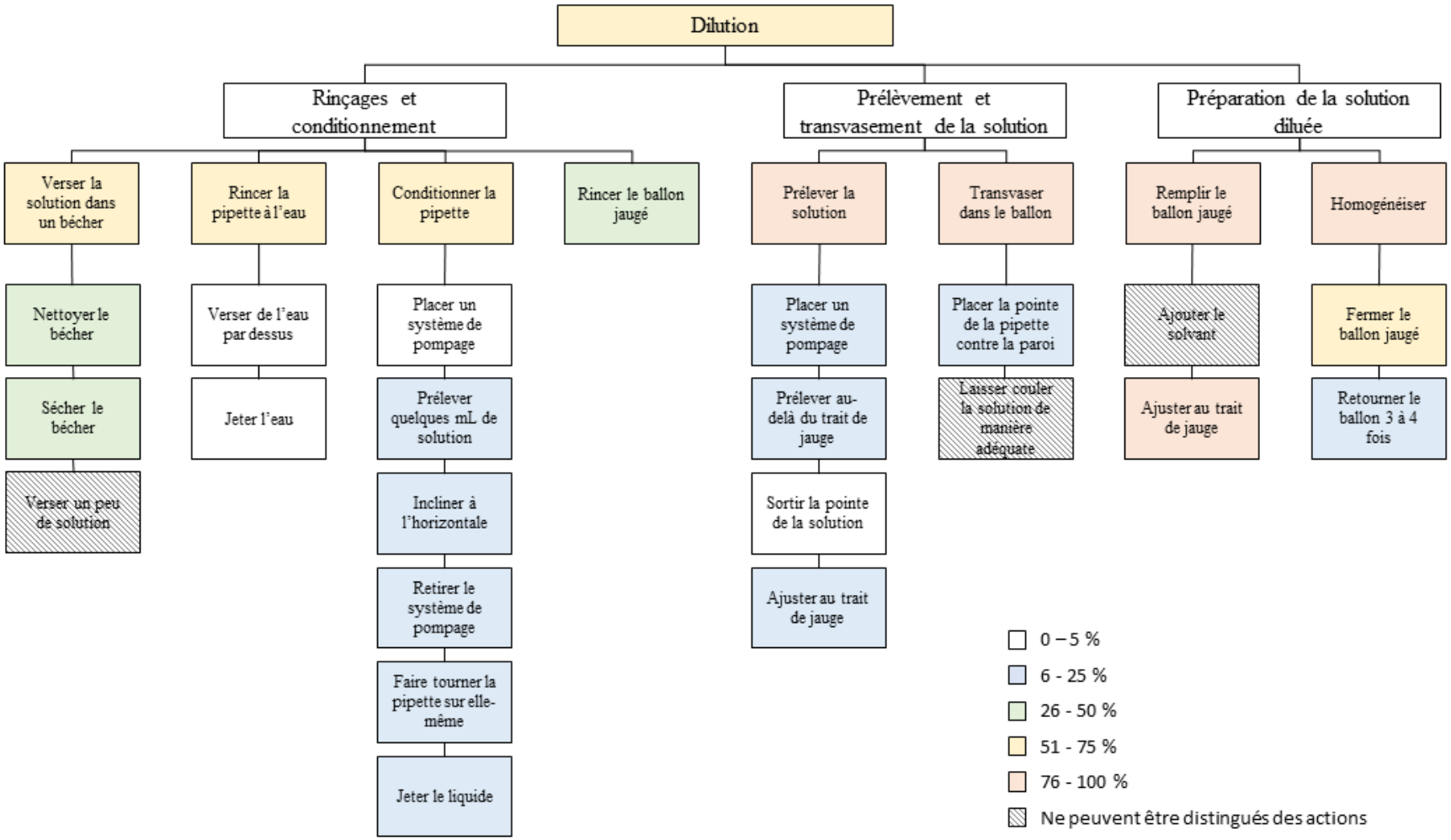


Figure 126 : Catégories de pourcentages d'étudiants incluant les différents gestes dans le protocole impliquant une dilution au TP 9 (Intégration)

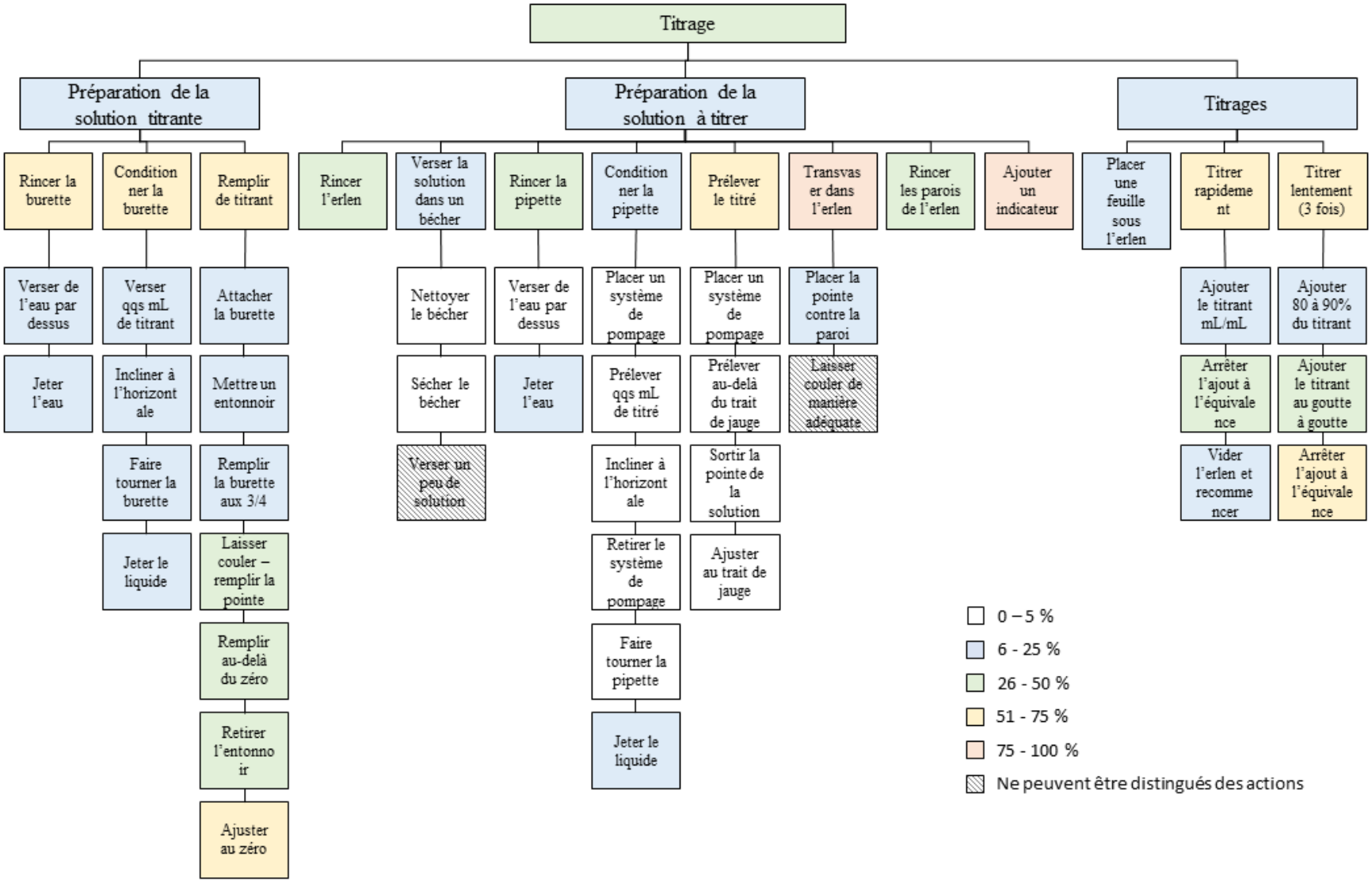


Figure 127 : Catégories de pourcentages d'étudiants incluant les différents gestes dans le protocole impliquant un titrage au TP 6 (Solubilité)

3.1. Niveau d'explicitation des protocoles

De manière générale, chaque niveau des arbres des tâches est présent. Les items les moins repris pas les étudiants concernent les facteurs de structuration. Ces derniers sont, la plupart du temps, repris sous forme de titre. Moins de la moitié des étudiants structurent leurs protocoles expérimentaux en parties plus petites. Les items présents en majorité dans les protocoles sont des actions. Cette observation était attendue du fait de la définition d'un protocole expérimental et de la façon dont ont été construits les arbres des tâches. En effet, ils ont été construits d'après les outils mis à disposition des étudiants. Les opérations, quant à elles, sont moins présentes voire, pour certaines actions, pratiquement absentes des protocoles. La présence de certaines de ces opérations peut être expliquée par la spécificité des gestes à effectuer, notamment la première fois que les étudiants décrivent la manière d'exécuter une dilution ou un titrage. Par exemple, lors de l'homogénéisation de la solution préparée dans le ballon jaugé en fin de dilution, il est nécessaire de retourner le ballon plusieurs fois. Si ce dernier geste n'est pas précisé, il est possible que les étudiants aient plutôt tendance à secouer le ballon de haut en bas ou de gauche à droite au lieu de le retourner. Un autre cas concerne les gestes à effectuer pour conditionner une pipette ou une burette. Il y a peu de chance que des étudiants n'ayant pas vu la manière de faire ces conditionnements le fassent adéquatement. Il en est de même pour le remplissage de la partie effilée de la burette. Les étudiants décrivent donc ces gestes de peur d'oublier la manière de s'y prendre. Une autre hypothèse pouvant expliquer la présence de certaines opérations est l'importance que revêtent certaines d'entre elles aux yeux des étudiants. Ces opérations demandent un peu plus d'attention que d'autres. C'est le cas de l'ajustement au trait de jauge d'une pipette jaugée ou d'un ballon jaugé ou encore l'ajustement à la graduation zéro de la burette. Au contraire, l'absence de certaines opérations s'explique par leur évidence. Les étudiants n'écrivent, par exemple, pas qu'il faut verser de l'eau dans la pipette pour la rincer ou qu'il faut surmonter la pipette d'un système de pompage lors du prélèvement d'une solution. Une comparaison de ces catégories de pourcentages pour les deux activités nous montre qu'un plus grand nombre d'étudiants incluent des facteurs de structuration et des opérations dans les protocoles présentant le titrage que dans ceux de la dilution. Cette observation appuie l'hypothèse issue de l'étude praxéologique : la procédure d'un titrage comporte plus d'actions et implique, ipso facto, une plus grande charge cognitive. Cela peut expliquer que les étudiants aient tendance à structurer un peu plus leurs écrits et/ou à y inclure plus de détails, de peur d'oublier d'exécuter certains gestes et/ou de commettre des erreurs. Le nombre d'étudiants incluant des actions dans leurs protocoles sont à peu

près identiques pour les deux activités. Cela s'explique, de nouveau, par la définition même de ce qu'est un protocole.

Les opérations correspondantes aux étapes de rinçage et de conditionnement de la pipette jaugée sont dans les mêmes catégories de pourcentages dans la figure 124 et dans la figure 125. En réalité, ces opérations sont pratiquement absentes dans les écrits des étudiants lorsqu'ils décrivent le titrage. Devant écrire les protocoles des deux activités l'un à la suite de l'autre lors du TP 4, les étudiants ne retranscrivent pas dans le protocole du titrage les étapes déjà présentes dans celui de la dilution. Dans certains cas, ils mentionnent qu'elles sont à réaliser en renvoyant à l'écrit précédent (Figure 128).

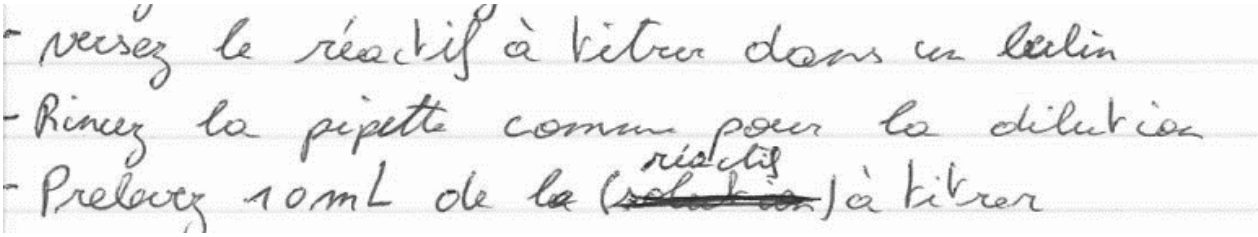

- versez le réactif à titrer dans un becher
- Rincez la pipette comme pour la dilution
- Prelevez 10mL de la (~~solution~~ réactif) à titrer

Figure 128 : Extrait du protocole de titrage d'un étudiant de l'année 2017-2018 (Annexe 15, n° 45)

3.2. Evolution au cours de l'année académique

Une évolution au cours de l'année scolaire est aussi observable. De manière globale, les figures 126 et 127 montrent que, tant au niveau de la dilution que du titrage, les pourcentages d'étudiants incluant des facteurs de structuration et des opérations diminuent. Sur les facteurs de structuration, les pourcentages d'étudiants ont baissé de moins de 10 %. Par contre, sur les opérations, les diminutions sont plus importantes, allant de 6 à 22 % pour la dilution et de 6 à 52 % pour le titrage. Généralement, ces baisses de pourcentages sont supérieures à 20 %. Certains étudiants semblent ne plus avoir besoin d'écrire tout ou partie des opérations. Leur protocole est alors moins détaillé. Ils n'ont, dès lors, plus besoin de facteurs de structuration. Cette diminution des pourcentages d'étudiants transcrivant des opérations s'accompagne d'une augmentation de ce pourcentage au niveau des actions de la dilution. Les étudiants semblent ne plus avoir besoin de décrire les gestes techniques à réaliser. Par contre, cette observation n'est pas valable en ce qui concerne la technique du titrage pour laquelle la diminution du pourcentage d'étudiants écrivant les opérations n'engendre pas d'augmentation de pourcentage au niveau des actions. Ces pourcentages d'étudiants transcrivant les actions ont même tendance à diminuer. Dans le cas de cette seconde technique, en plus de ne plus avoir besoin de décrire les gestes techniques « routiniers », les opérations, il semble que les étudiants ne trouvent plus nécessaire de mentionner toutes les actions. Il est

probable que cette observation soit due à la technique elle-même. En effet, comme mentionné lors de l'analyse praxéologique, un titrage implique une répétition de certains gestes au moins quatre fois. Cela peut expliquer une meilleure rétention de ces derniers par les étudiants.

Les arbres des tâches vont être, dans la suite de cet écrit, analysés de manière plus fine. Le regroupement des pourcentages en catégories permet de faire apparaître certaines tendances mais il faut aussi rendre compte de différences pouvant ne pas apparaître et des changements non significatifs pouvant être mis en évidence.

Entre les deux protocoles décrivant la dilution (Figures 124 et 126), les pourcentages d'étudiants incluant chacune des actions ne varient pas sauf pour trois d'entre elles. De plus, ce pourcentage augmente pour l'une des opérations. Le tableau 45 reprend ces actions et cette opération ainsi que leur évolution au cours de l'année.

Gestes	***Evolution du pourcentage d'étudiants***
Actions	
Verser la solution dans un bécher	Diminution (75 à 61 %)
Rincer le ballon jaugé	Augmentation (10 à 27 %)
Homogénéiser	Augmentation (74 à 88 %)
Opérations	
Ajuster au trait de jauge du ballon jaugé	Augmentation (84 à 96 %)

Tableau 45 : Evolution du pourcentage d'étudiants incluant certaines actions et une opération dans le protocole d'une dilution

Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer la diminution du pourcentage d'étudiants écrivant qu'il faut verser un peu de solution dans un bécher avant le prélèvement. Les étudiants ne ressentent plus le besoin de l'écrire car ils retiennent « On ne prélève pas directement dans la bouteille » comme une règle ou oublient de l'écrire.

La seconde fois qu'ils rédigent le protocole d'une dilution, beaucoup d'étudiants sont plus synthétiques. Au lieu d'écrire toutes les étapes de rinçage (pipette, bécher(s), ballon jaugé), ils écrivent de rincer toute la verrerie utile (Figure 129, page ci-après). Nous avons fait le choix de considérer que l'étudiant rapportant qu'il rince toutes les pièces de verrerie rince aussi le ballon jaugé, ce qui explique l'augmentation. La lecture des protocoles ne nous permet cependant pas de l'affirmer.

TP 4

En premier lieu, il faut rincer le matériel, en commençant par la pipette pour la dilution.
Rincer la pipette avec de l'eau distillée et puis verser l'eau distillée dans la poubelle (bocal prévu à cet effet)
Imprégner la pipette avec la solution voulant être diluée, tout en imprégnant bien la solution sur toute la paroi en l'inclinant horizontalement.
Verser le contenu dans la poubelle.

TP 9

1) Nettoyer la verrerie
2) Prendre un ballon jaugé de 50 mL et mettre au préalable un peu d'eau.

Figure 129 : Extraits des protocoles de dilution d'un étudiant de l'année 2017-2018 lors des TP4 (Annexe 16, n° 70) et 9 (Annexe 18, n° 216)

De même, au lieu d'écrire qu'il faut retourner le ballon 3 à 4 fois, ils écrivent qu'il faut homogénéiser. Dans ce cas-ci, le nombre d'étudiant écrivant l'opération « Retourner le ballon 3 à 4 fois » diminue au profit de celui qui mentionne l'action « Homogénéiser ».
La dernière hausse de pourcentage ne se voit pas lors de la comparaison des figures 124 et 126 malgré une différence de plus de 10 % entre le premier et le second protocole de dilution. La première fois que les étudiants rédigent le protocole d'une dilution, ils ne connaissent pas encore tous les termes spécifiques utilisés en laboratoire. Certains étudiants semblent donc éviter de parler de « trait de jauge » et vont plutôt exprimer cette idée sous d'autres forme comme … « pour atteindre les 100,0 mL » ou « Remplir le ballon jaugé avec précision », etc (Figure 130). La seconde fois qu'ils rédigent ce protocole, ils emploient les termes « trait de jauge ».

TP 4

→ Verser de l'eau distillée dans le ballon jaugé jusqu'à 100 mL ⇒ la solution a donc été diluée 10 X.

TP 9

- Rincer le bécher et ajouter l'eau de rinçage dans le ballon
- Ajouter le ballon jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.
- Fermer le ballon avec le bouchon et homogénéiser.

Figure 130 : Extraits des protocoles de dilution d'un étudiant de l'année 2016-2017 lors des TP4 (Annexe 16, n° 24) et 9 (Annexe 18, n° 194)

La figure 127 fait référence au titrage. Cet arbre des tâches, lorsqu'il est comparé à celui de la figure 125, montre que la plupart des actions et opérations sont moins reprises par les étudiants, comme mentionné précédemment. Seules trois exceptions sont présentées dans le tableau 46.

Gestes	***Evolution du pourcentage d'étudiants***
Actions	
Remplir la burette	Augmentation (31 à 62 %)
Rincer la pipette	Augmentation (23 à 32 %)
Conditionner la pipette	Augmentation (11 à 24 %)

Tableau 46 : Evolution du pourcentage d'étudiants incluant certaines actions dans la rédaction du protocole d'un titrage

L'augmentation du nombre d'étudiants écrivant qu'ils doivent remplir la burette s'accompagne d'une diminution de ce nombre au niveau des opérations ayant trait au remplissage de la burette. Comme pour la dilution, le pourcentage d'étudiants mentionnant les opérations diminue au profit de celui qui écrit l'action correspondante.
Comme signalé auparavant, les étudiants ne mentionnent pas spécifiquement les étapes de rinçage. Ils n'écrivent pas qu'il faut rincer la pipette mais plutôt qu'il est nécessaire de rincer toutes les pièces de verrerie à l'eau.
La seconde fois qu'ils écrivent le protocole d'un titrage, il n'y a pas de dilution préalable. Les étudiants ne savent donc pas se rapporter à un écrit précédent. Ils sont donc obligés de mentionner l'étape de conditionnement. De plus, comme pour le remplissage de la burette, l'augmentation du nombre d'étudiants écrivant l'action « Conditionner la pipette » s'accompagne d'une diminution de ce nombre au niveau des opérations.

4. Synthèse

Les protocoles rédigés par les étudiants se différencient tant par leur nature de leur contenu que par le degré de détail. En effet, la première fois qu'ils doivent écrire un protocole, les étudiants y incluent des éléments technologiques et théoriques, c'est-à-dire du « logos », en plus de l'intitulé de la tâche et du descriptif technique, la « praxis ». La présence de l'intitulé de la tâche indique un début de structuration du travail à réaliser, ce qui est confirmé par la présence de facteurs de structuration dans un certain nombre de protocoles. Ce besoin de structure est justifié par le degré de détail des protocoles. Les étudiants écrivent les actions liées à la technique de laboratoire à effectuer mais

également un grand nombre d'opérations, notamment quand le geste à réaliser est spécifique ou qu'il demande une attention plus importante lors de sa réalisation. Un résumé des analyses faites sur les premiers protocoles est schématisé à la figure 131.

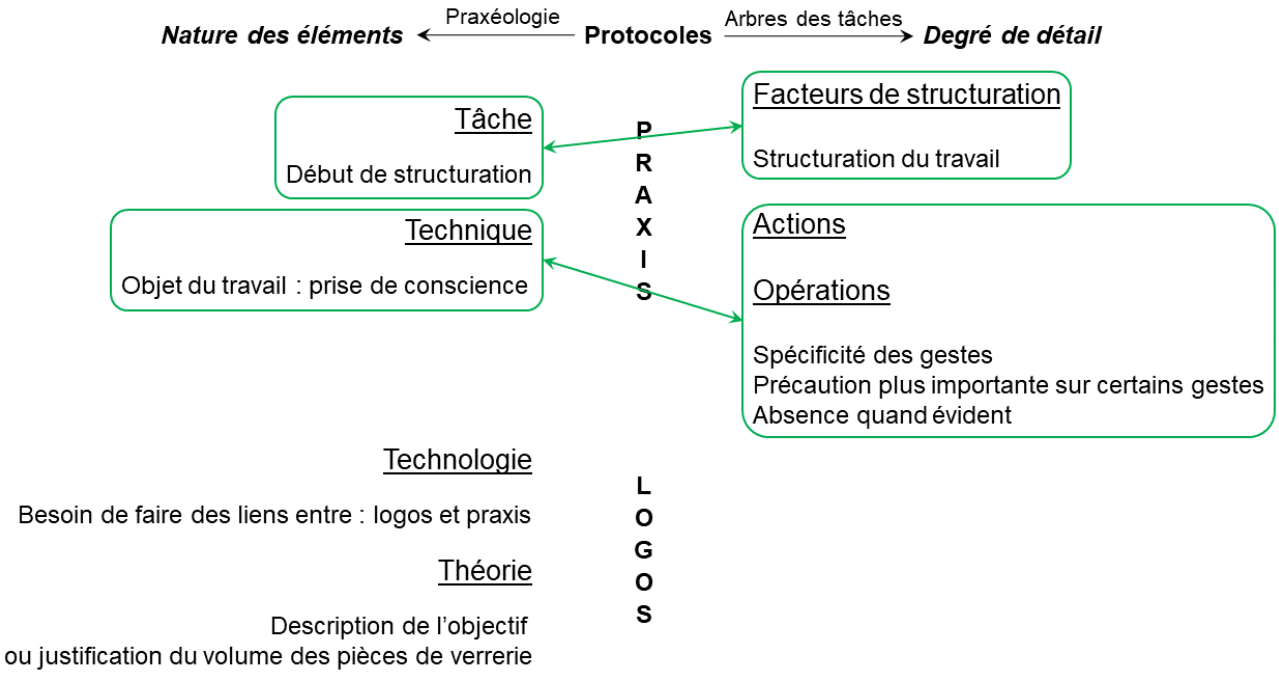


Figure 131 : Résumé de l'analyse des premiers protocoles rédigés par les étudiants

La seconde fois que les étudiants sont amenés à écrire ces mêmes protocoles, une majorité d'entre eux y incluent nettement moins d'éléments de technologie et de théorie. Cette observation est à associer avec la diminution du pourcentage d'étudiants y intégrant des facteurs de structuration et des opérations. Les écrits des étudiants contiennent moins d'éléments de la « praxis ». Par voie de conséquence, il y a également moins de justification de cette « praxis » et donc moins de technologie.

Moins d'étudiants intègrent de la technologie mais également de la théorie dans les écrits. Ils prennent conscience d'une règle d'écriture d'un protocole : il n'est censé présenter que les gestes techniques à réaliser. La diminution liée aux opérations est également en partie due au respect d'une règle mais technique celle-là : ils ont intégré la nécessité de rincer toutes les pièces de verrerie à l'eau avant de commencer une manipulation quelle qu'elle soit. Ils ne rédigent donc plus les étapes de rinçage. Un résumé de cette analyse de l'évolution des protocoles est présenté à la figure 132 (page ci-après).

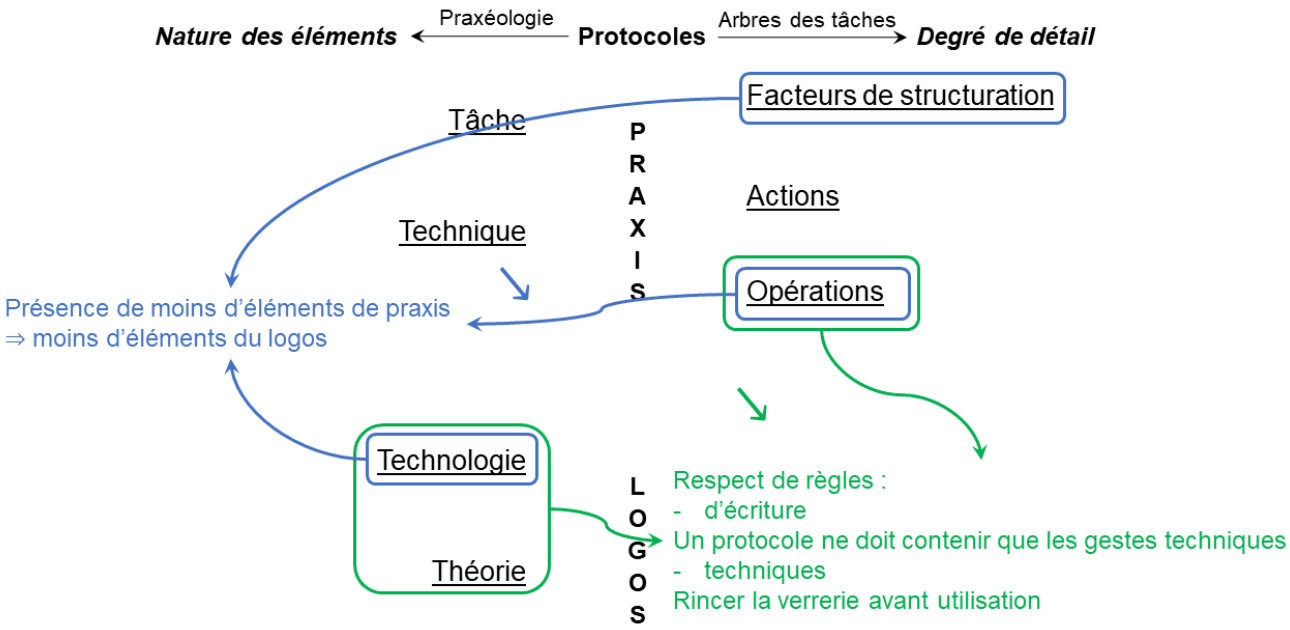


Figure 132 : Résumé de l'analyse de l'évolution des protocoles rédigés par les étudiants

On pourrait penser, logiquement, que la réduction des pourcentages d'étudiants incluant des opérations dans leurs protocoles est lié à une augmentation de ces mêmes pourcentages au niveau des actions. C'est effectivement le cas ou, tout au moins, cela dépend de la technique de laboratoire envisagée. Lorsque la technique de laboratoire implique une itération de certains gestes, ce qui est le cas du titrage, les étudiants ne ressentent apparemment plus le besoin de décrire ces derniers. Il s'ensuit une diminution du nombre d'étudiants mentionnant certaines des actions itératives. Dans le cas de la dilution, tous les gestes ne sont effectués qu'une seule fois. C'est alors une augmentation des pourcentages d'étudiants transcrivant les actions qui est observée.

Un chimiste expérimenté, s'il doit écrire un protocole permettant de déterminer la teneur d'une substance dans un produit, se contente de mentionner qu'il effectue, si besoin, une dilution d'un facteur x et un dosage de la solution obtenue par telle autre à telle concentration. Les procédures qui, en début de formation, sont des activités, deviennent, avec l'expérience, de simples actions à effectuer. De même en est-il des actions qui se transforment en opérations au fur et à mesure de l'apprentissage. Cette tendance s'observe déjà en cours de première année d'études supérieures en chimie. Lorsque les étudiants débutent leurs études, ils ne connaissent, pour la plupart, rien de la pratique liée aux techniques de laboratoire. Lorsqu'il leur est demandé d'écrire le protocole de l'une de ces techniques, ils la décrivent donc de manière détaillée, incluant un certain nombre de gestes qui, pour l'expérimentateur confirmé, sont routiniers.

L’objectif de l’apprentissage est d’en arriver à ce qu’ils ne doivent plus y faire mention. Il faut, pour cela, plusieurs années de pratique.

Chapitre 10
Impact du protocole sur la tâche effective des étudiants lors d’activités expérimentales

L'analyse des protocoles rédigés par les étudiants ne donne qu'une idée de leurs éventuels acquis techniques. Le mieux est d'observer les étudiants en TP, pendant qu'ils réalisent les techniques de laboratoire dont ils ont rédigé le protocole, c'est-à-dire pendant qu'ils effectuent la tâche dite effective. En les observant, il est possible de se demander si les gestes effectués correspondent aux actes repris dans les protocoles. En clair, les protocoles servent-ils de ressource principale lors de l'exécution des techniques de laboratoire décrites ? Pour répondre à ces questions, il est nécessaire, au préalable, de relever les gestes techniques effectivement réalisés. A quelques petites différences liées à la nature de l'objet d'analyse (protocoles écrits et films) près, les mêmes arbres des tâches que ceux qui ont été utilisés lors du chapitre précédent sont employés. En effet, une mise en corrélation avec les protocoles n'est réalisable qu'à partir du moment où les grilles d'observation sont peu ou prou identiques. Ces arbres des tâches décrivent, en réalité, la tâche prescrite, celle qui est attendue des étudiants. Ce travail de description des gestes techniques réalisés va dès lors également permettre une comparaison entre ces gestes et ce qui est normalement considéré comme une dilution ou un titrage adéquat, conforme aux attendus institutionnels. Pour rappel, les protocoles ont été rédigés par les étudiants dans le cadre du TP 4. C'est la première séance de laboratoire impliquant une dilution et un titrage. Pour étudier les « acquis » techniques des étudiants, il faut effectuer cette même étude des gestes techniques lors d'une autre séance de TP impliquant ces deux techniques de laboratoire. La séance de TP choisie est la suivante. Durant ce TP 5, un protocole succinct est fourni aux étudiants. Ce dernier ne décrit pas les gestes à réaliser en détail, comme montré à la figure 35 du chapitre 4. La différence entre ces TP réside donc essentiellement dans le protocole expérimental. Il est dès lors possible de regarder plus précisément l'impact que peut avoir le protocole sur les gestes techniques réalisés par les étudiants.

Cette analyse comporte deux parties. D'abord, tout comme pour le TP 4, un relevé des gestes techniques réalisés par les étudiants doit être fait et les adéquations et divergences avec la tâche prescrite mises en évidence. Ensuite, une comparaison des tâches effectives lors des deux TP, 4 et 5, est effectuée.

Les questions de recherche traitées dans ce chapitre ont donc pour sujets :

- la corrélation entre le contenu des protocoles rédigés par les étudiants et les gestes techniques réalisés lors de la séance de laboratoire ;
- la conformité de la tâche réalisée par les étudiants ;
- l'impact du protocole sur les gestes techniques réalisés en laboratoire.

1. Analyses liées à la tâche réalisée lors du TP 4 impliquant la rédaction du protocole expérimental

1.1. La tâche effective réalisée par les étudiants lors du TP 4

Comme mentionné dans l'introduction, la tâche effective est la tâche réellement effectuée par les étudiants. Lors de cette analyse, les films des étudiants sont visionnés et leurs gestes recensés à l'aide d'arbres des tâches tels que décrits au paragraphe 2.2.3 du chapitre 4. Il n'est tenu compte que des actes pouvant être reliés à la technique de laboratoire considérée, raison pour laquelle nous ne parlons pas d'analyse de « l'activité » des étudiants. En effet, lors de cette étude, nous faisons abstraction des interactions et autres vécus des étudiants. Cependant, les termes actions et opérations sont quand-même employés pour désigner, respectivement, les actes poursuivant un but scientifique même s'il est possible que les étudiants n'en aient pas conscience et les gestes à réaliser pour mener ces actes à bien. Les résultats de l'analyse des gestes techniques réalisés par 22 étudiants lors du TP 4 sont repris dans les figures 133 et 134 (pages 284 – 285). Pour rappel, les cases hachurées :

- désignent le nom de la technique de laboratoire à réaliser ;
- reprennent des facteurs de structuration et ne sont dès lors pas visibles lors des TP ;
- décrivent un acte qui n'est pas différenciable de l'action correspondante ;
- décrivent un acte qui n'est pas toujours clairement visible sur les vidéos.

La description des actes posés par les étudiants est reprise dans l'annexe 23.

Figure 133 : Catégories de nombre d'étudiants incluant les différents gestes lors de la dilution au TP 4 (Acide-base)

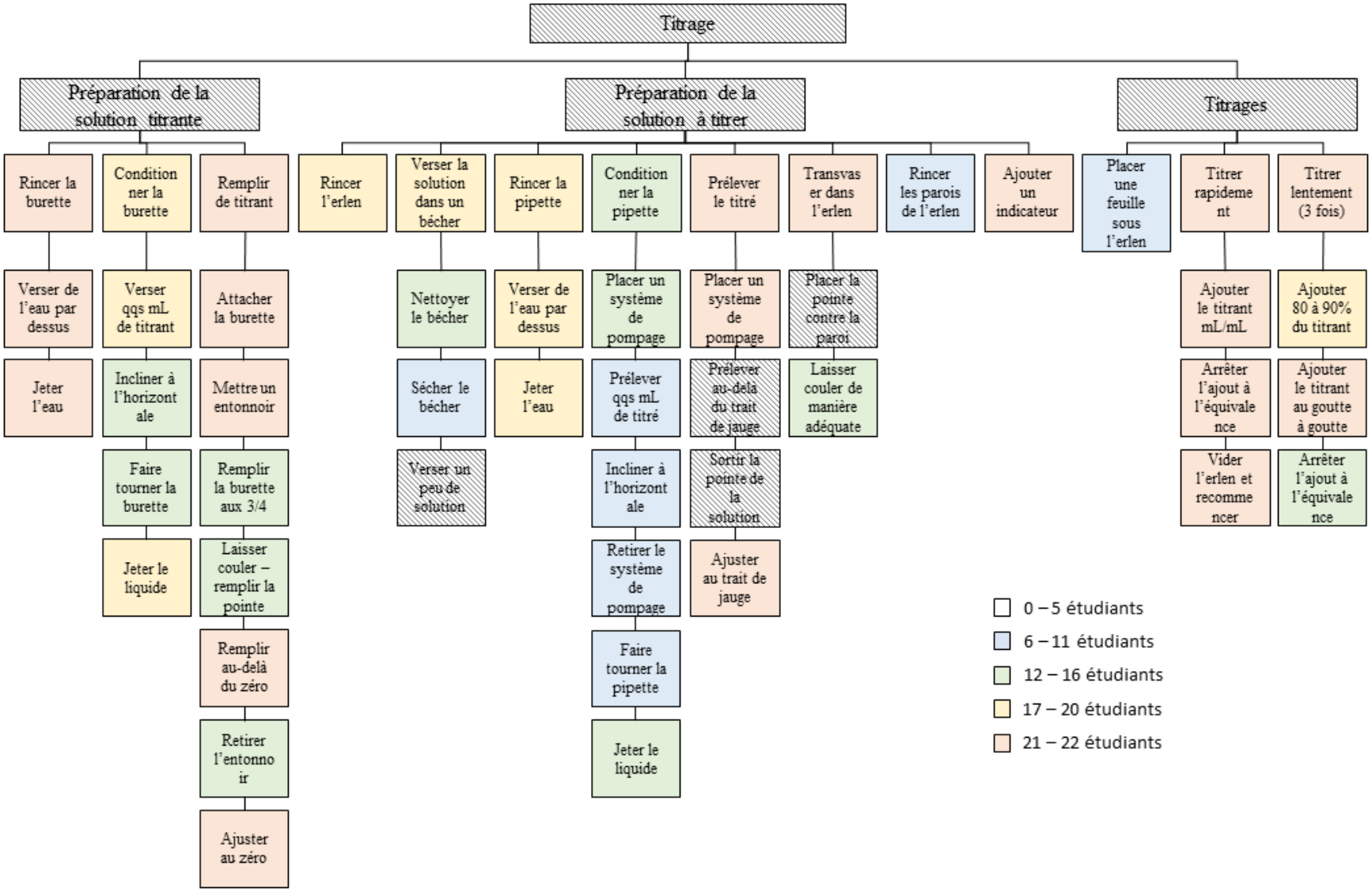


Figure 134 : Catégories de nombre d'étudiants incluant les différents gestes lors du titrage colorimétrique au TP 4 (Acide-base)

1.2. Adéquation entre la tâche décrite dans les protocoles rédigés et la tâche réalisée lors du TP 4

Les tableaux 47 et 48 reprennent les pourcentages d'étudiants effectuant et/ou écrivant les différents gestes respectivement lors d'une dilution et d'un titrage. Les données sont présentées en pourcentages malgré le faible nombre d'étudiants pour des raisons de facilité lors de la comparaison.

Dilution	***Pourcentages d'étudiants (%)***	
	Laboratoire	***Protocole***
Verser la solution dans un bécher	95	75
Nettoyer le bécher	50	35
Sécher le bécher	41	33
Rincer la pipette à l'eau	95	74
Verser de l'eau par-dessus	91	0
Jeter l'eau	95	9
Conditionner la pipette	91	68
Placer un système de pompage	91	0
Prélever quelques millilitres de solution	73	26
Incliner à l'horizontale	73	35
Retirer le système de pompage	86	26
Faire tourner la pipette sur elle-même	73	33
Jeter le liquide	91	35
Rincer le ballon jaugé	50	10
Prélever la solution	100	91
Placer un système de pompage	100	10
Ajuster au trait de jauge	100	28
Transvaser dans le ballon	100	98
Remplir le ballon jaugé	100	93
Ajuster au trait de jauge	95	84
Homogénéiser	86	74
Fermer le ballon jaugé	91	62
Retourner le ballon 3 à 4 fois	86	41

Tableau 47 : Pourcentages d'étudiants réalisant et/ou écrivant les gestes dans le cadre d'une dilution

Titrage	***Pourcentages d'étudiants (%)***	
	Laboratoire	***Protocole***
Rincer la burette	100	82
Verser de l'eau par-dessus	100	22
Jeter l'eau	100	27
Conditionner la burette	91	81
Verser quelques millilitres de titrant	77	22
Incliner à l'horizontale	59	28
Faire tourner la burette	59	27
Jeter le liquide	91	38
Remplir de titrant	100	31
Attacher la burette	100	59
Mettre un entonnoir	100	32
Remplir la burette aux ¾	59	55
Laisser couler – remplir la pointe	59	57
Remplir au-delà du zéro	100	35
Retirer l'entonnoir	82	46
Ajuster au zéro	100	85
Rincer l'erlenmeyer	86	62
Verser la solution dans un bécher	82	20
Nettoyer le bécher	59	35
Sécher le bécher	41	33
Rincer la pipette à l'eau	82	23
Verser de l'eau par-dessus	82	0
Jeter l'eau	82	9
Conditionner la pipette	55	11
Placer un système de pompage	55	0
Prélever quelques millilitres de solution	41	26
Incliner à l'horizontale	36	35
Retirer le système de pompage	45	26
Faire tourner la pipette sur elle-même	36	33
Jeter le liquide	55	35
Prélever le titré	100	76
Placer un système de pompage	100	10

Ajuster au trait de jauge	100	28
Transvaser dans l'erlenmeyer	100	96
Rincer les parois de l'erlenmeyer	41	61
Ajouter un indicateur	100	95
Placer une feuille sous l'erlenmeyer	45	38
Titrer rapidement	100	77
Ajouter le titrant mL/mL	95	59
Arrêter l'ajout à l'équivalence	100	65
Vider l'erlenmeyer	100	49
Titrer lentement	100	78
Ajouter 80 à 90 % du titrant	91	65
Ajouter le titrant au goutte à goutte	100	91
Arrêter l'ajout à l'équivalence	59	54

Tableau 48 : Pourcentages d'étudiants réalisant et/ou écrivant les gestes dans le cadre d'un titrage

Les différents gestes sont repris dans un tableau mentionnant s'ils sont faits ou non en laboratoire et écrits ou pas dans les protocoles. Nous considérons que le geste est fait ou écrit s'il est effectué ou décrit par au moins 50 % des étudiants. Ce pourcentage est une valeur permettant de limiter le nombre de catégories et, ainsi, de faciliter les analyses.

De manière générale, ce qui est repris dans les protocoles de la majorité des étudiants (de 51 à 100 %) est aussi réalisé en laboratoire. La seule exception à cette observation est l'action du titrage « Rincer les parois de l'erlenmeyer » qui n'est effectuée que par 41 % des étudiants bien qu'elle soit écrite dans 61 % des protocoles. Deux hypothèses peuvent être émises pour l'expliquer. Il est possible que les étudiants n'aient pas connaissance ou conscience du but de l'action qui est de récupérer la quantité de matière de réactif à titrer restée sur les parois lors du transvasement de la solution. Ils ne voient alors pas l'utilité de la faire. Une autre possibilité est l'oubli par les étudiants d'exécuter l'action. Cela est d'autant plus probable que la solution de réactif à titrer est incolore. Ils ne voient donc pas s'il en reste sur les parois.

Les gestes qui ne sont pas faits en laboratoire ne sont pas non plus repris dans les protocoles. Il s'agit essentiellement d'opérations telles que « Nettoyer le bécher » et « Sécher le bécher » dans la dilution et/ou le titrage. C'est également le cas des opérations de conditionnement de la pipette qui ne sont effectuées par la majorité des étudiants que lors de la dilution (73 à 91 %) et pas lors du titrage (36 à 55 %). Dans les protocoles décrivant le titrage, certains étudiants ont tendance à renvoyer au protocole

de la dilution et la plupart n'écrivent pas qu'il faut conditionner la pipette. Pour expliquer que le conditionnement de la pipette n'est pas effectué lors du titrage, il faut donc revenir sur les outils mis à disposition. Les fiches techniques décrivent la dilution et le titrage n'expliquent pas comment conditionner la pipette mais renvoient à d'autres fiches qui l'explicitent en détails. Les fiches techniques ne permettent donc pas d'expliquer cette différence entre la dilution et le titrage. La vidéo présentant la technique de la dilution montre le conditionnement de la pipette contrairement à celle qui présente la technique du titrage. Cette dernière ne fait que le mentionner et renvoie à une autre vidéo. Le fait de n'être que mentionné et pas montré peut expliquer que ce ne soit pas écrit dans la majorité des protocoles et que les étudiants ne le fassent pas lors du titrage. En plus des opérations, deux actions sont aussi écrites et réalisées par moins de la moitié des étudiants : le rinçage du ballon jaugé et l'utilisation d'une feuille blanche pour visualiser l'équivalence. De nouveau, la seule exception à cette assertion est l'action « Rincer les parois de l'erlenmeyer » citée précédemment.

Les deux précédentes observations montrent l'importance du contenu du protocole expérimental lors d'un apprentissage technique. Les étudiants exécutent les gestes décrits dans les protocoles et il y a une adéquation entre les gestes non effectués en laboratoire et non décrits dans les protocoles. Cela rejoint ce que mentionnait Abraham (2011) dans son article : lors d'un apprentissage technique, les étudiants ont besoin d'instructions plus directives.

Généralement, tout ce que les étudiants ont écrit dans leur protocole est réalisé en laboratoire. Ce n'est pas pour autant que ce qui n'est pas écrit dans les protocoles n'est pas effectué. La plupart des gestes réalisés en laboratoire ne sont pas repris dans la majorité des protocoles rédigés par les étudiants. Les étudiants exécutent plus de gestes en laboratoire que ce qu'ils écrivent dans les protocoles. Cette observation était attendue car les protocoles de laboratoire, tout comme les recettes de cuisine, ne reprennent usuellement que les gestes absolument nécessaires à la poursuite de l'activité. Ils ne mentionnent pas les gestes qui semblent aller de soi, routiniers, qui sont implicites. C'est la raison pour laquelle les catégories utilisées pour classer les gestes lors de l'analyse des protocoles d'une part, et de la tâche effectivement réalisée d'autre part ne sont pas les mêmes. Les étudiants n'écrivent pas tous les gestes qu'ils comptent effectuer dans le détail lorsqu'ils rédigent un protocole. Il est probable que la plupart des gestes non mentionnés paraissent, du point de vue des étudiants, évidents. C'est le cas des opérations :

- impliquées dans les rinçages de la pipette et de la burette ;

- de placement ou de retrait du système de pompage lors des conditionnements et prélèvements à la pipette ;
- du prélèvement ou du transvasement de quelques millilitres de solution lors des conditionnements respectivement de la pipette et de la burette ainsi que du jet de cette solution ;
- des différents ajustements au trait de jauge ou à la graduation zéro ;
- de l'utilisation de l'entonnoir pour remplir la burette ;
- …

D'autres opérations ne sont pas forcément évidentes mais sont particulières à la technique de laboratoire réalisée. Elles sont, de ce fait, montrées dans les vidéos et mentionnées dans les fiches techniques. Il est possible que les étudiants les retiennent et les effectuent car elles sont spécifiques aux techniques de dilution ou de titrage. Par exemple, l'opération « Retourner le ballon 3 à 4 fois » pour homogénéiser la solution en fin de dilution est un geste que peut retenir l'étudiant car il n'est pas habituel de retourner un contenant pour en mélanger le contenu. La plupart du temps, lorsqu'il faut mélanger quelque chose, on a tendance à secouer sans forcément retourner. De même en est-il des opérations liées au conditionnement de la burette ou de la pipette.

Les gestes réalisés par les étudiants en laboratoire sans être décrits dans les protocoles sont des opérations qui :

- paraissent routinières ou évidentes ;
- sont particulières à la technique de laboratoire à réaliser.

Si l'on ne tient compte que de l'analyse des protocoles, il n'est pas possible d'expliquer que certains gestes soient effectués et d'autres pas. Les protocoles sont importants mais pas suffisants. Il est nécessaire d'aller analyser l'activité en laboratoire c'est-à-dire de tenir compte du vécu des étudiants tant d'un point de vue personnel (réflexion, pensée, …) qu'interactionnel avec ses pairs ou l'encadrant.

1.3. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors du TP 4

La tâche prescrite est celle qui est décrite dans les documents fournis aux étudiants qui ont servi de base à la construction des arbres des tâches. Il s'agit donc de la tâche telle que prévue par l'institution. La tâche effective est donc ce que l'étudiant a effectivement réalisé en laboratoire. Ce paragraphe a pour objet la comparaison de la technique personnelle des étudiants au sens praxéologique du terme (tâche effective) à la technique reconnue institutionnellement (tâche prescrite).

Lors de la dilution (Figure 133), toutes les actions sont exécutées par la majorité des étudiants sauf une : le rinçage du ballon jaugé. Ceci peut être expliqué par la manière

dont l'information est transmise aux étudiants. Le dossier de fiches techniques et les vidéos (Annexe 18) mentionnent qu'il faut « Verser la solution dans le ballon jaugé propre en le tenant à 45° ». Il n'est pas spécifiquement écrit ou dit qu'il faut le rincer comme c'est le cas pour la pipette jaugée. Cette explication est aussi valable en ce qui concerne le bécher. Les opérations « Nettoyer le bécher » et « Sécher le bécher » sont exécutées par moins de la moitié des étudiants car les documents ne font mention que d'un bécher « propre et sec » sans exprimer qu'il faut le nettoyer et le sécher. Ainsi, les gestes qui ne sont pas décrits par un verbe d'action sont généralement effectués par moins d'étudiants.
L'opération « Laisser couler la solution de manière adéquate » lors de l'action de transvasement dans le ballon jaugé n'est pas exécutée de manière adéquate par la grande majorité des étudiants. Lors du TP 4, ils utilisent pour la première fois une pompe à crémaillère pour prélever la solution. N'en connaissant pas le fonctionnement, certains étudiants appuient sur la crémaillère de la pompe pour faire couler la solution prélevée au lieu d'appuyer sur la barre de relargage rapide. Ce faisant, ils exercent une pression sur la solution et en chassent la dernière goutte alors qu'une pipette jaugée est calibrée en en tenant compte. Le conditionnement de la pipette est également un geste qui n'est pas réalisé de manière adéquate par quelques étudiants. Ils la remplissent complètement de solution avant de la vider. Le but du conditionnement, éliminer l'eau de rinçage, est atteint mais l'action correspondante n'est pas exécutée de manière adéquate. Ils ne prélèvent pas quelques millilitres de solution et n'inclinent pas la pipette pour la faire tourner sur elle-même. Certaines actions sont donc effectuées mais toutes les opérations correspondantes ne le sont pas forcément, ce qui engendre des erreurs techniques.
Lors du titrage (Figure 134), le conditionnement de la pipette est l'une des actions effectuée par le moins d'étudiants et ce, malgré le fait d'avoir dû l'exécuter lors de la dilution. Il est possible qu'ils considèrent que, comme la nature de la solution à prélever n'a pas changé, il n'est pas nécessaire de reconditionner la pipette. Pour eux, c'est la même solution malgré la dilution. De plus, ils ont, pour la plupart, noté qu'il fallait conditionner la pipette dans le protocole de la dilution mais n'ont pas tous jugé utile de le réécrire dans celui du titrage. Il est donc aussi possible qu'il s'agisse d'un oubli.
Les deux autres actions exécutées pas le moins d'étudiants sont « Rincer les parois de l'erlen » et « Placer une feuille sous l'erlen ». La première de ces actions est probablement oubliée par les étudiants ou jugée non indispensable. L'oubli est d'autant plus probable que, la solution à titrer étant incolore, les étudiants ne voient pas s'il en reste sur les parois. La seconde action n'est pas absolument nécessaire. La feuille de papier permet de mieux distinguer un changement de couleur. S'il est facilement perceptible, la plupart des étudiants ne ressentent pas le besoin d'utiliser une feuille de

papier. Au niveau des opérations, les mêmes observations que lors de la dilution peuvent être faites en ce qui concerne le rinçage et le séchage du bécher, le conditionnement de la pipette jaugée et l’utilisation de la pompe à crémaillère lors du transvasement d’une solution.

En ce qui concerne le conditionnement de la burette, certains étudiants ont tendance, à l’instar de celui de la pipette, à verser quelques millilitres de solution dans la burette ou à la remplir complètement avant de la vider sans la faire tourner sur elle-même. L’action est réalisée mais de manière non adéquate.

Toujours concernant le remplissage de la burette, quelques étudiants négligent de remplir la partie effilée de la burette et/ou de retirer l’entonnoir de la burette avant l’ajustement de la solution à la graduation zéro. Il est vrai que ces deux gestes n’empêchent pas de mener à bien l’action correspondante mais peuvent engendrer des erreurs sur les résultats des mesures. Pour les étudiants, ces deux gestes peuvent donc apparaître comme des détails qui ne sont pas indispensables.

La dernière opération faite par une partie seulement des étudiants est l’arrêt de l’ajout de solution titrante à l’équivalence. La première fois qu’ils effectuent un titrage lent, il arrive que les étudiants dépassent l’équivalence et prennent quand-même note de la valeur du volume de titrant ajouté. Il est possible que certains d’entre eux pensent que cela n’aura pas d’impact sur leurs résultats ou que l’impact sera minimisé par les valeurs obtenues lors des titrages suivants.

Ainsi, certains gestes peuvent ne pas être effectués ou de manière inadéquate car ils :

- ne sont pas décrits par un verbe d’action ;
- ne sont pas repris dans le protocole de la manipulation ;
- ont été effectués préalablement dans le cadre d’une autre technique ;
- sont jugés non indispensables ;
- ne sont effectivement pas indispensables pour mener à bien la manipulation ;
- sont réalisés pour la première fois ;
- sont oubliés.

L’importance des outils mis à disposition et de la manière dont les instructions y sont formulées transparaît lors de cette analyse. Les actes à poser qui ne sont pas décrits par un verbe d’action suivi d’un complément sont réalisés par moins d’étudiants que les autres gestes.

De plus, lorsque la technique de laboratoire à effectuer comporte un plus grand nombre de gestes comme le titrage, une partie non négligeable des étudiants ont tendance à omettre l’exécution de certains d’entre eux, à les oublier. Il est probable que ce soit dû à une surcharge cognitive durant l’activité.

2. Analyses liées à la tâche réalisée lors du TP 5 dont le protocole est fourni

2.1. La tâche effective réalisée par les étudiants lors du TP 5

Les résultats de l'analyse des gestes techniques réalisés par les 23 étudiants filmés lors du TP 5 sont repris dans les figures 135 et 136 (pages 294 – 295). Dans le cadre de ce TP, le protocole fourni aux étudiants ne mentionne que le fait de devoir diluer la solution à titrer et d'exécuter quatre titrages en milieu acide. Aucune opération n'est mentionnée. Le titrage à réaliser dans le cadre de ce TP ne nécessite pas d'indicateur. C'est pour cette raison que la case dans la figure 136 est hachurée.

La description des actes des étudiants filmés lors de cette activité expérimentale est reprise dans l'annexe 24.

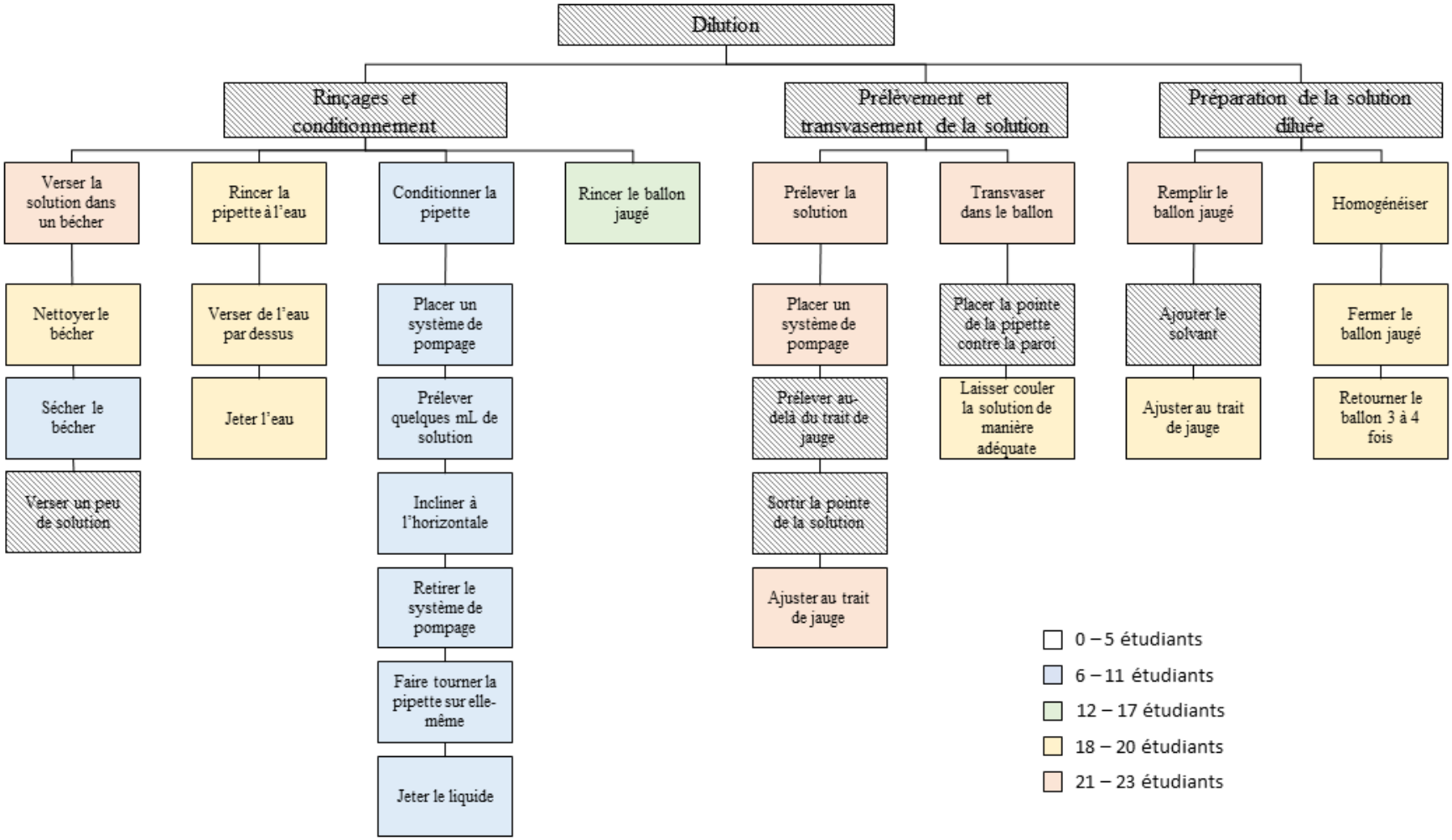


Figure 135 : Catégories de nombre d'étudiants incluant les différents gestes lors de la dilution au TP 5 (Redox)

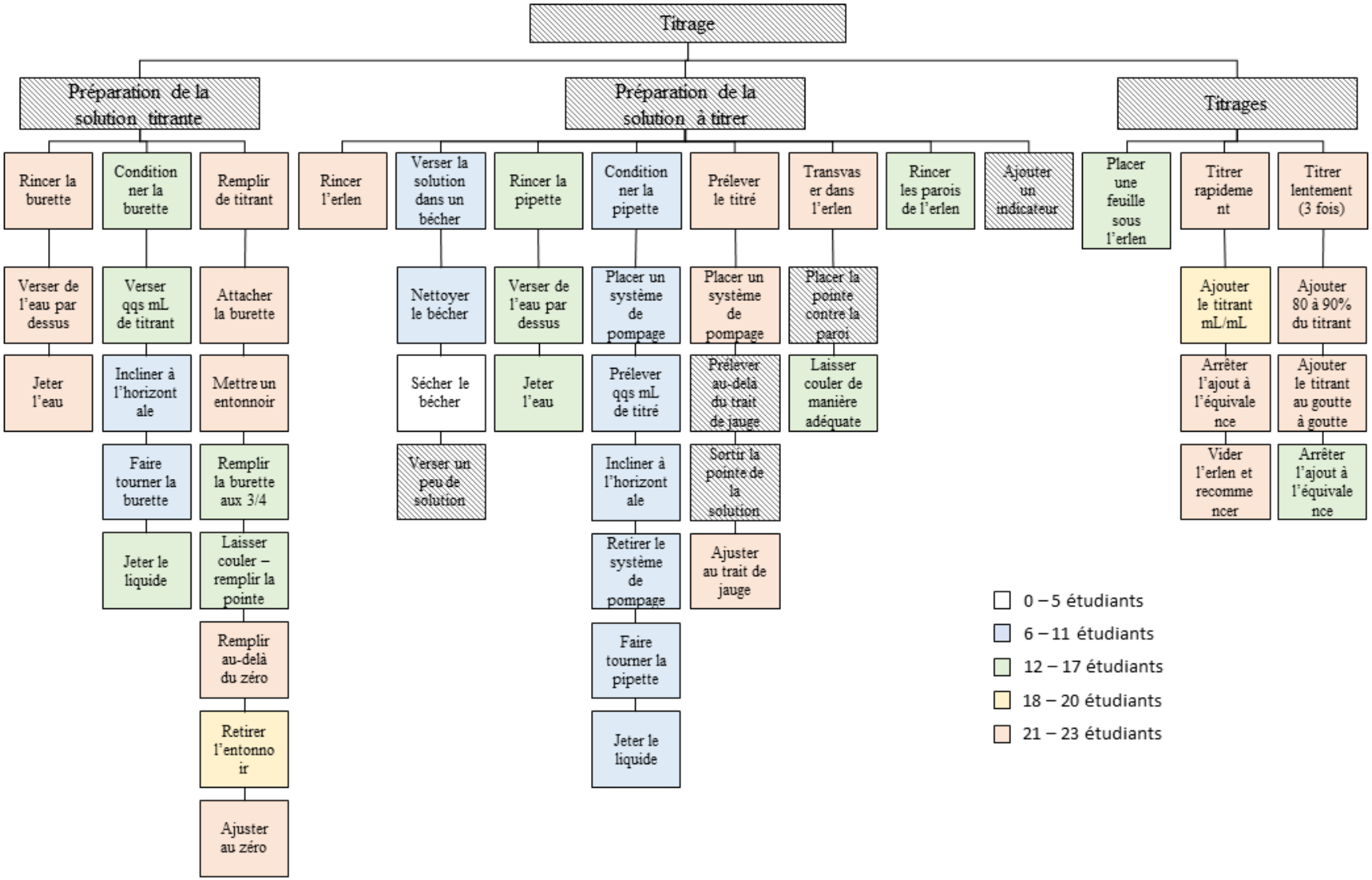


Figure 136 : Catégories de nombre d'étudiants incluant les différents gestes lors du titrage au TP 5 (Redox)

2.2. Adéquation entre tâches prescrite et effective lors du TP 5

Lors de la dilution, le conditionnement de la pipette est effectué par 11 étudiants sur 23. Il est probable que la raison pour laquelle les 12 autres étudiants n'aient pas fait ce conditionnement soit un oubli. Ils pensent à rincer la pipette mais pas forcément à la conditionner. Cette observation est également valable lors du titrage, que ce soit pour le conditionnement de la pipette ou de la burette. Une autre possibilité est liée aux buts des gestes techniques. Il est nécessaire de conditionner la pipette et la burette mais pas le ballon jaugé et l'erlenmeyer. Il est possible que, ne sachant pas ce qu'il faut conditionner après rinçage ou pas, ils préfèrent ne pas conditionner les pièces de verrerie pour lesquelles ils ne sont pas sûrs qu'il faille le faire. Ils ne font alors pas de lien entre le geste à effectuer et le but poursuivi.

De manière générale, les étapes de rinçage sont faites par la majorité des étudiants. Le rinçage de la pipette est ainsi réalisé par 19 étudiants lors de la dilution et ceux de la burette et de l'erlenmeyer respectivement par 22 et 23 étudiants. Il est possible qu'ils retiennent qu'il faut rincer les pièces de verrerie employées comme une règle à appliquer quelle que soit la situation. C'est d'ailleurs souvent par là qu'ils commencent. La préparation du matériel est très souvent suivie de son rinçage à l'eau déminéralisée.
Certaines étapes de rinçage sont cependant réalisées par moins d'étudiants que d'autres. Ainsi en est-il du rinçage du ballon jaugé ou de la pipette lors du titrage. Le premier était déjà négligé par la majorité des étudiants lors de la dilution au TP 4. Il n'est donc pas étonnant que cette étape soit de nouveau l'une des moins réalisées lors du TP 5. En outre, le TP 5 étant l'une des séances de laboratoire les plus longues, il est possible que des étudiants aient considéré que certaines pièces de verrerie étaient suffisamment propres et qu'il n'était donc pas nécessaire de les rincer. En effet, elles sont censées avoir été nettoyées par les étudiants ayant eu TP précédemment et sont sèches. Pour les étudiants, elles sont donc propres.
En ce qui concerne le rinçage de la pipette lors du titrage, il est possible que les étudiants considèrent que, l'ayant rincée en début de manipulation lors de la dilution, il ne soit plus nécessaire de le faire lors du titrage. Ceci est d'autant plus probable que, nonobstant la concentration, les solutions à prélever sont de nature identique. Cette hypothèse a déjà été émise lors de l'analyse de la tâche réalisée lors du TP 4. Il est bien entendu possible que ce soit aussi un simple oubli. Pour revenir sur le conditionnement, il est logique, puisque le rinçage de la pipette n'est pas réalisé, que le conditionnement ne le soit pas non plus.

Une autre étape de rinçage effectuée par moins d'étudiants est celui des parois de l'erlenmeyer suite au transvasement de la solution à titrer (12 étudiants). Les hypothèses pour l'expliquer sont les mêmes que lors de l'analyse de la tâche réalisée lors du TP 4 : oubli ou idée que ce n'est pas indispensable.
Le fait de ne pas mettre de feuille sous l'erlenmeyer juste avant de titrer peut aussi avoir la même raison que celle évoquée précédemment lors de cette analyse : cette étape n'est pas obligatoire. Certains étudiants ne la font donc pas.

Une action du titrage n'est effectuée que par 9 étudiants sur les 23 filmés : verser la solution dans un bécher propre et sec avant d'en prélever. Cette action est pourtant réalisée lors de la dilution par 21 étudiants. En fait, les étudiants retiennent qu'il ne faut pas prélever directement dans la bouteille de solution. Ainsi, lors de la dilution, ils transvasent une partie de la solution à prélever dans un bécher. Lors du titrage, la solution à titrer a été préparée par l'étudiant lui-même et se trouve dans un ballon jaugé, pas dans une bouteille. Ils pensent donc qu'il n'est pas nécessaire de verser un peu de solution dans un bécher. Ils en oublient le but principal de cette action : éviter de transférer une éventuelle impureté de la pipette dans la solution. En versant une certaine quantité de solution dans un bécher, seule cette partie de solution contiendra l'éventuelle impureté. Une fois que le bécher est vidé et qu'un peu de solution y est de nouveau versée, l'impureté est soit éliminée, soit diluée très fortement. Il y a donc moins de risques que les résultats soient impactés.

La plupart des opérations les moins effectuées le sont car l'action correspondante l'est aussi. Ainsi en est-il des opérations en lien avec les étapes de conditionnement de la pipette et de la burette, du rinçage de la pipette lors du titrage et du transvasement de solution dans un bécher avant prélèvement. La seule autre opération qui soit effectuée par moins de la moitié des étudiants est le séchage du bécher suite à son rinçage lors de la dilution. C'est probablement dû à un oubli. Tout comme pour les conditionnements, les étudiants pensent à rincer la verrerie mais pas à la suite des gestes à poser.
Il reste quelques opérations qui ne sont pas effectuées par la grande majorité des étudiants. Les premières de ces opérations impliquent de remplir la partie effilée de la burette lors de son remplissage. Comme mentionné lors d'une analyse précédente, ne pas remplir la partie effilée de la burette n'empêche pas de mener à bien l'action correspondante même si cela peut engendrer des erreurs sur les résultats. Une autre de ces opérations est le fait de laisser couler le liquide dans l'erlenmeyer lors du titrage. De nouveau, les étudiants ne font pas la distinction entre l'utilité de la barre de relargage rapide et celle de la crémaillère de la pompe à crémaillère. Pour eux, elles ont la même fonction lorsqu'il s'agit de transvaser la solution. La dernière de ces opérations est l'arrêt

de l'écoulement à l'équivalence lors du titrage lent. C'est la deuxième activité expérimentale impliquant un titrage. Les étudiants éprouvent encore des difficultés à manipuler le robinet de la burette. Il arrive donc souvent qu'ils dépassent l'équivalence. Ils prennent cependant note du volume malgré cette erreur.

De nouveau, l'importance du protocole expérimental transparaît. Certaines des actions non effectuées le sont probablement car non décrites dans le protocole. D'autres ne sont pas réalisées car considérées comme ayant déjà été exécutées lors d'une manipulation précédente ou, à tort ou à raison, comme non indispensables. Les actions effectuées sont celles qui sont reprises dans le protocole.

Les actions sont effectuées parce qu'elles sont reprises dans le protocole ou que, du fait de leur répétition, elles sont considérées comme des règles à appliquer. Il n'est pas non plus inenvisageable que certains gestes soient effectués par les étudiants parce qu'ils voient certains de leurs pairs les exécuter, parce qu'une personne les a conseillés ou …

3. Comparaison des tâches effectives lors des deux TP impliquant une dilution et un titrage (TP 4 et 5)

La comparaison est faite entre les figures 133 et 135 et entre les figures 134 et 136. L'absence de protocole à rédiger lors du TP 5 engendre des changements dans la tâche réalisée par les étudiants en laboratoire et permet de visualiser les acquis engendrés par la rédaction du protocole au TP précédent.

Le nombre d'étudiants filmés lors de chaque TP, respectivement 22 et 23, étant similaires, cette analyse est effectuée en comparant directement les nombres d'étudiants réalisant chaque action sans passer par des pourcentages.

Beaucoup d'éléments peuvent être retirés de ces comparaisons. Seules les variations les plus significatives et/ou qui apportent de nouvelles données sont reprises dans la suite de cette analyse.

En ce qui concerne les actions, on remarque que les étapes de rinçage sont généralement réalisées par plus d'étudiants, ou tout au moins autant, lors du TP 5 que lors du TP 4. Un seul type de rinçage échappe à cette observation, celui de la pipette jaugée tant au niveau de la dilution que du titrage. Cependant, les nombres d'étudiants pour ces deux étapes passent de 21 à 19 pour la dilution et de 18 à 17 pour le titrage. Ces deux diminutions, pour autant qu'elles soient significatives, sont assez modestes au regard des augmentations pour les autres étapes de rinçage. En effet, lorsqu'une augmentation du nombre d'étudiants est observée, elle varie entre cinq et dix étudiants. Cela vient corroborer une hypothèse émise lors de l'analyse de la tâche effective réalisée

durant le TP 5. Ils rincent toutes les pièces de verrerie dès qu'ils les sortent de leur tiroir ou paillasse comme s'il s'agissait d'une règle à appliquer. Pour ce qui est du rinçage des parois de l'erlenmeyer, l'augmentation s'explique par l'objet de la manipulation. Lors du TP 4, les étudiants qui rincent les parois de l'erlenmeyer (9 étudiants – 41 %) le font avant de débuter le titrage, juste après avoir transvasé la solution et ne le font plus par la suite. Dans cette manipulation, les solutions titrée et titrante sont incolores. Lors du TP 5, les étudiants rincent les parois avant de débuter le titrage mais aussi et surtout en cours de titrage. Ce dernier étant manganimétrique, la solution titrante est de couleur violette. Lorsqu'une goutte de titrant coule sur les parois de l'erlenmeyer, elle se voit et est rincée par les étudiants.

Une diminution est observée pour l'action de verser de la solution dans un bécher lors du titrage. Il y a neuf étudiants de moins qui le font lors du TP 5. Ils prélèvent directement la solution à titrer dans le ballon jaugé. Comme mentionné précédemment, les étudiants retiennent qu'il ne faut pas prélever directement dans la bouteille de solution. Pour eux, le ballon jaugé ne constitue pas une « bouteille ». De plus, ils peuvent penser qu'il n'est pas nécessaire d'éviter de mettre des impuretés dans la solution présente dans le ballon jaugé car elle a été préparée par eux. Cependant, l'analyse des figures 134 et 136 ne permet pas d'expliquer que moins d'étudiants effectuent ce geste lors du TP 5 que lors du TP 4. C'est en effet la même situation : une solution qu'ils préparent eux-mêmes dans un ballon jaugé. Il est donc nécessaire de regarder le cours de l'action lors des deux TP pour comprendre cette différence. Elle est essentiellement due à l'activité de l'encadrant lors du TP 4. Il rappelle presque systématiquement aux étudiants qui se trompent ou qui sont sur le point d'effectuer cette étape qu'ils doivent transvaser la solution dans un bécher. Ce n'est pas le cas lors du TP 5. Ils ne transvasent donc pas quelques millilitres de solution à titrer dans un bécher. Par contre, ils le font pour la solution titrante. Les étudiants versent un peu de solution titrante dans un bécher avant d'en transvaser dans la burette. Il s'avère que, dès qu'une solution se trouve dans une bouteille, il soit nécessaire, pour eux, de transvaser dans un bécher. Il semblerait que les étudiants suivent des règles sans penser aux buts des gestes qu'ils effectuent. Bien entendu, cela sous-entend qu'ils connaissent ces buts, ce qui ne peut être affirmé. Cette observation a déjà été faite dans un autre cadre, celui de TP de physique : « *en TP, les étudiants s'enfermaient dans des réseaux d'actions, évitant éventuellement de les piloter pas des réseaux conceptuels* » (Séré & Beney, 1997, p.98)

Si les nombres d'étudiants effectuant chacune des opérations sont comparés pour les deux TP, on remarque là aussi des augmentations et des diminutions. Au niveau de la dilution, il y a une augmentation du nombre d'étudiants (de 16 à 18) laissant couler la

solution de manière adéquate lors du transvasement dans le ballon jaugé. Certains étudiants ont compris le fonctionnement de la pompe à crémaillère. Ils n'appuient plus sur la crémaillère de la pompe pour vider la pipette mais utilisent la barre de relargage rapide ou retirent la pompe de la pipette. Deux autres opérations sont moins effectuées par les étudiants : l'ajustement au trait de jauge du ballon jaugé et la fermeture du ballon en vue de l'homogénéisation. En ce qui concerne l'ajustement au trait du ballon jaugé, trois cas de figure peuvent se présenter lorsque les étudiants dépassent le trait de jauge. Certains étudiants vont recommencer la dilution comme préconisé, d'autres vont continuer la manipulation comme si de rien n'était et quelques-uns vont prélever le surplus de solution à l'aide d'une pipette pasteur. Il est possible que ces derniers croient éliminer l'excédent d'eau ajoutée. Ils n'imaginent alors pas qu'une partie de la quantité de matière présente dans la solution à diluer pourrait déjà être dans le liquide excédentaire. Ils ne mettent pas en lien le geste technique et la théorie associée. Pour la seconde opération, les étudiants ferment le ballon avec leur doigt pour homogénéiser au lieu d'utiliser un bouchon ou un morceau de parafilm. Il n'y a pas de risques corporels tant que la solution à diluer n'est pas toxique et/ou n'est pas très concentrée. Utiliser son doigt pour fermer un récipient en vue d'une homogénéisation est cependant fortement déconseillé. De plus, il n'est pas sûr que, ce faisant, les étudiants n'aient pas introduit une impureté dans leur solution. Les étudiants ne pensent pas toujours aux conséquences que peuvent avoir leurs gestes, tant d'un point de vue théorique que du point de vue de la sécurité.

Lorsque les étudiants doivent reproduire des gestes effectués une fois lors d'une séance de laboratoire antérieure, la plupart des gestes nécessaires pour mener à bien l'activité sont réalisés par une grande majorité des étudiants. Les nombres d'étudiants effectuant les gestes ne varient que pour les actes de rinçage, de conditionnement, … des gestes qui n'ont pas d'impact direct sur l'objet de la manipulation en tant que tel mais bien sur l'exactitude et, éventuellement, la précision des résultats. Certains gestes sont plus que probablement effectués par les étudiants car ils retiennent des règles qu'ils appliquent comme rincer toute la verrerie ou ne pas prélever directement dans une bouteille. Ces règles peuvent être, dans certains cas, adéquates et, dans d'autres, inadéquates. L'application de ces règles engendre des actions qualifiées de « prototypiques » (Séré & Beney, 1997). Les étudiants agissent sans forcément faire de lien avec les concepts en jeu. La nécessité d'une itération des techniques dans différentes manipulations durant lesquels il est demandé de faire des liens entre les gestes et les concepts les sous-tendant se fait donc sentir. De plus, les gestes seront réalisés ou non suivant les conditions dans lesquelles la manipulation se déroule : intervention de l'encadrant, difficultés rencontrées, …

4. Synthèse

La tâche effective que les étudiants réalisent en laboratoire est en partie impactée par le protocole lorsqu'ils sont amenés à le rédiger. En général, tous les gestes décrits dans les protocoles sont réalisés et les gestes qui, au contraire, ne sont pas réalisés ne sont également pas décrits (Figure 137).

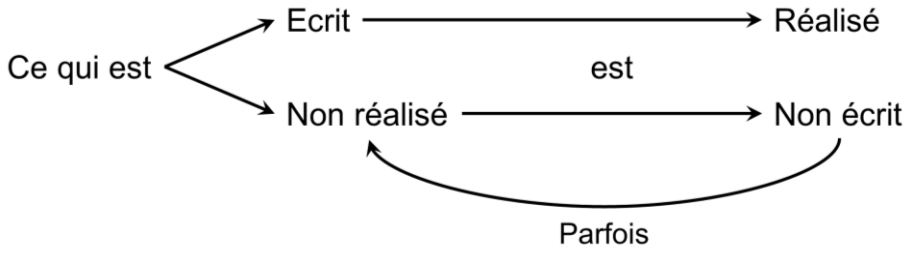


Figure 137 : Résumé des relations entre les protocoles rédigés et la tâche effective

Par contre, cela ne veut pas dire que tout ce qui n'est pas écrit n'est pas réalisé. En effet, les étudiants ne prennent pas la peine de transcrire tous les actes qu'ils comptent poser lors de la séance de TP, notamment lorsque le geste à effectuer paraît évident. Ils font donc plus que ce qu'ils décrivent. Le protocole seul ne permet pas d'expliquer tous les actes techniques exécutés ou non par les étudiants durant les TP. Il n'est pas l'unique ressource à laquelle se réfèrent les étudiants.

De plus, l'observation de la tâche effective a mis en évidence que les actes ne sont pas toujours réalisés de manière adéquate. Lorsqu'ils sont effectués, ils ne sont pas tous conformes aux attendus institutionnels, à la tâche prescrite. Différentes explications permettent de rendre compte de l'inadéquation de ces gestes.

Bien entendu, parmi ces explications se trouve le manque d'entraînement. Il est illusoire de penser qu'un étudiant puisse effectuer les actes demandant le plus de doigté sans commettre d'erreurs dès les premières fois.

Une autre de ces explications concerne les actions qui ne sont que partiellement exécutées. Les étudiants savent qu'ils doivent faire une action particulière mais n'ont parfois aucune idée de la manière de s'y prendre. Ils ne connaissent pas les opérations afférentes et font, dès lors, comme ils pensent devoir le faire.

C'est d'autant plus important lors du TP 5 pour lequel un protocole succinct est fourni. Dans ce cas, ils commettent même des erreurs sur les actions elles-mêmes, ce qui a essentiellement un impact sur l'exactitude des résultats.

Comme mentionné dans ce chapitre, il n'y a pas que des gestes réalisés inadéquatement mais aussi des gestes techniques complètement absents de la tâche

effective. Diverses hypothèses peuvent expliquer que certains actes ne soient pas réalisés par les étudiants lors des différents TP.
La première est bien entendu leur absence des protocoles expérimentaux. C'est surtout observable dans le cadre du TP 5 pour lequel aucune étape de conditionnement n'est mentionnée. Les étudiants n'ont, pour la plupart, pas conditionné leurs pièces de verrerie.
Une deuxième hypothèse explicative pourrait être la méconnaissance du but des actions par les étudiants. Ne sachant pas pourquoi faire tel ou tel geste, ils peuvent le juger comme non indispensable (à tort ou à raison), considérer qu'une itération n'est pas nécessaire s'il a déjà été réalisé lors d'une manipulation antérieure ou l'oublier.
La troisième supposition est liée plus particulièrement aux termes employés dans les protocoles ou plutôt dans les outils mis à disposition des étudiants. Lorsque le geste n'est pas décrit par un verbe d'action, il n'est, la plupart du temps, pas réalisé.

L'impact du protocole transparaît donc clairement lors de l'étude de la conformité des actes posés par les étudiants mais également lors de la comparaison des tâches effectives des deux TP. Il est d'ailleurs à noter que, lorsque les étudiants n'ont accès qu'à un protocole succinct, ils ont tendance à respecter des règles comme l'obligation de rincer toute la verrerie avant utilisation ou la défense de prélever les solutions directement dans les bouteilles. Le respect de ces règles sans réflexion préalable peut d'ailleurs parfois engendrer des erreurs.
Un résumé des résultats issus des études de la conformité de la tâche effective et de l'impact du protocole est présenté à la figure 138 (page ci-après).

Ainsi, la tâche effective ne correspond pas à la tâche prescrite. Cela est confirmé par un précepte de didactique professionnelle. Un expert n'exécute pas toujours la tâche prescrite à la lettre mais adapte ses actions à la situation. Dans le cadre de ces activités expérimentales, les étudiants adaptent eux aussi leurs actions à la situation d'apprentissage dans laquelle ils se trouvent. Selon cette théorie de la didactique professionnelle, l'action est orientée par des concepts pragmatiques, des invariants opératoires. Il est d'ailleurs plus que probable que les règles mentionnées précédemment en fassent partie. Pour déterminer quels autres concepts les étudiants mettent en œuvre lors des séances de laboratoire, il est nécessaire de s'intéresser à leur activité au laboratoire dans son entièreté et pas seulement à la tâche effective mais aussi de leur demander de raconter leurs actions. En effet, un individu ne prend conscience du sens de ses actions qu'à partir du moment où il fait un récit de son vécu.

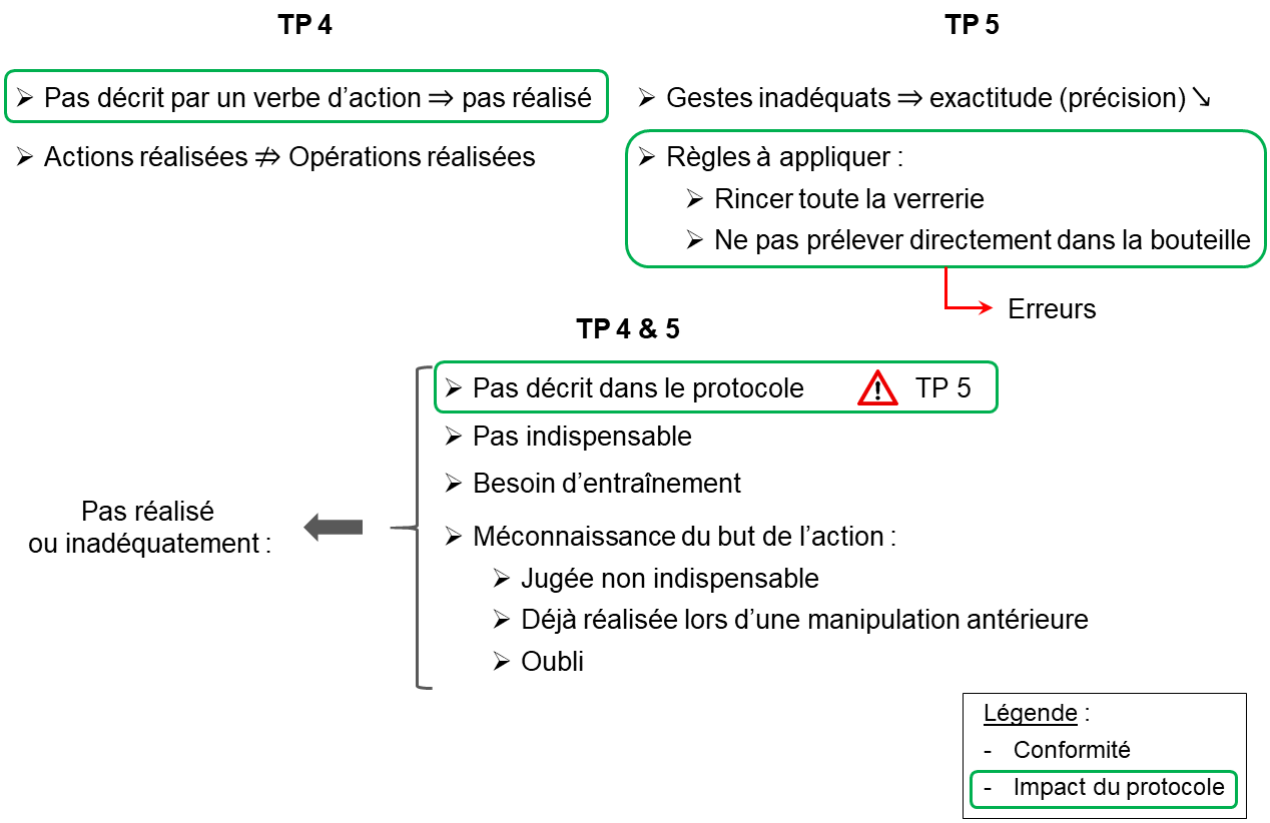


Figure 138 : Résumé des analyses liées à la tâche effective des étudiants

Chapitre 11
Activité des étudiants en laboratoire

Comme mentionné dans le précédent chapitre, il est nécessaire de s'intéresser au sens que les étudiants donnent à leurs actions, la tâche effective ne correspondant pas à la tâche prescrite. Elle ne correspond d'ailleurs pas non plus à l'activité des étudiants. En effet, cette dernière est bien plus riche que ne l'est la simple exécution de la tâche. Les étudiants, lorsqu'ils sont en laboratoire, font plus qu'exécuter une tâche. Ils sont en activité avec toutes les caractéristiques que ce mot suppose : une nature sociale, un impact de l'environnement, un motif, des actions et opérations, … La notion d'activité ne comporte pas que l'activité visible, perceptible mais également l'activité de pensée, de réflexion. C'est d'ailleurs cette volonté d'avoir accès à cette activité de pensée qui est à la base des méthodes d'entretiens issues de la psycho phénoménologie (entretien d'explicitation) et du cours d'action (autoconfrontation, verbalisation simultanée ou interruptive).

Le présent chapitre s'intéresse justement au sens que les étudiants donnent à leurs actes, que ces derniers fassent partie de la tâche effective ou pas. Dans les actes ne pouvant pas être assimilés à une partie de la tâche effective, nous nous doutons qu'il y a des parties interactionnelles, les étudiants manipulant les uns à côté des autres, et des périodes de lecture du protocole, ce que Vermersch (1985) rapporte comme étant des prises d'informations. Il serait illusoire de penser qu'il n'y a que cela. Les actes des étudiants ont été observés et nous avons tenté de tous les classer dans différentes catégories. Pour rappel, ces dernières sont présentées dans le tableau 20 dans le chapitre exposant la méthodologie de recherche. Parmi elles, il y a les « gestes parasites ». Ainsi, en plus de se demander les raisons qui sous-tendent les actes techniques posés par les étudiants, nous pouvons nous poser la question de l'utilité de ces gestes, que nous qualifions de « parasites », aux yeux des étudiants. Pour répondre à ces questions, les étudiants ont été interviewés lors d'entretiens d'autoconfrontation. Ils ont été amenés à revenir sur leur activité en laboratoire et à expliquer ce à quoi ils pensaient. L'optique choisie pour analyser ces entretiens est de s'intéresser aux ressources employées par les étudiants. Nous en connaissons déjà deux : les protocoles expérimentaux et l'encadrant. Jusqu'à présent, ils sont apparus comme permettant d'obtenir des informations techniques, sur les gestes à effectuer. En réalité, il y a bien d'autres ressources auxquelles se réfèrent les étudiants et elles ne servent pas qu'à procurer des informations techniques. C'est également l'objet de ce chapitre : les ressources employées par les étudiants, ce que nous appelons aussi des référents, ainsi que les raisons pour lesquelles elles sont utilisées. Comme stipulé lors de la formulation des questions de recherche, ces raisons donnent directement accès aux fonctions remplies par les actes des étudiants.

Les questions de recherche abordées dans ce chapitre ont donc pour sujet :

- les actes des étudiants, qu'ils soient compris dans la tâche effective ou pas ;
- les ressources ou référents utilisés par les étudiants ;
- les fonctions des différents actes réalisés lors des activités de laboratoire.

1. Catégorisation des actes des étudiants en laboratoire

1.1. TP impliquant la rédaction du protocole expérimental (TP 4)

La description des actes réalisés par les étudiants inscrits en première année d'études en 2017-2018 et 2018-2019 lors du TP 4 ainsi que leur catégorisation se trouvent en annexe 23. Comme l'écrivait Vermersch (1985), les actions effectuées par les étudiants sont morcelées en actions élémentaires, ce qu'il a appelé atomisation de l'action. Cependant, ces morcellements ne correspondent pas toujours à la lecture d'instructions, qu'il a appelée prise d'informations, comme son article semble le suggérer. D'une part, les prises d'informations peuvent se faire non seulement au travers de la lecture d'instructions qui, dans ce cas-ci, se trouvent dans la procédure de laboratoire mais aussi d'échanges verbaux entre étudiants ou avec l'encadrant au cours de l'activité. D'autre part, les étudiants exécutent, en plus de ces actes de prises d'informations et des gestes liés à la tâche, des actes qui ne peuvent être classés sous le vocable « prise d'informations » ou « action ». Ils effectuent des gestes qui ne semblent pas servir à l'exécution de la tâche. Ces gestes morcellent également les actions à effectuer.

Dans la suite de cet écrit, l'activité des étudiants est représentée sous forme de diagrammes circulaires reprenant la proportion de chacune des catégories de gestes comme décrit dans la figure 139 (page ci-après).

Chaque diagramme correspond à l'activité filmée d'un étudiant lors d'une séance de laboratoire. La durée de cette activité est reprise en-dessous. Dans le cadre de cette recherche, les étudiants ont été renommés. Pour rappel, un geste est dit parasite lorsqu'il n'est pas nécessaire pour mener à bien la manipulation comme, par exemple, le rinçage du bécher servant de poubelle ou une discussion sans lien avec la manipulation à réaliser. Un geste ne pouvant pas être classé dans une autre catégorie est mis dans la classe « Sans thématique ». Souvent, il s'agit d'aller remplir la pissette d'eau déminéralisée servant aux différents rinçages ou d'écouter une remarque générale faite par l'encadrant.

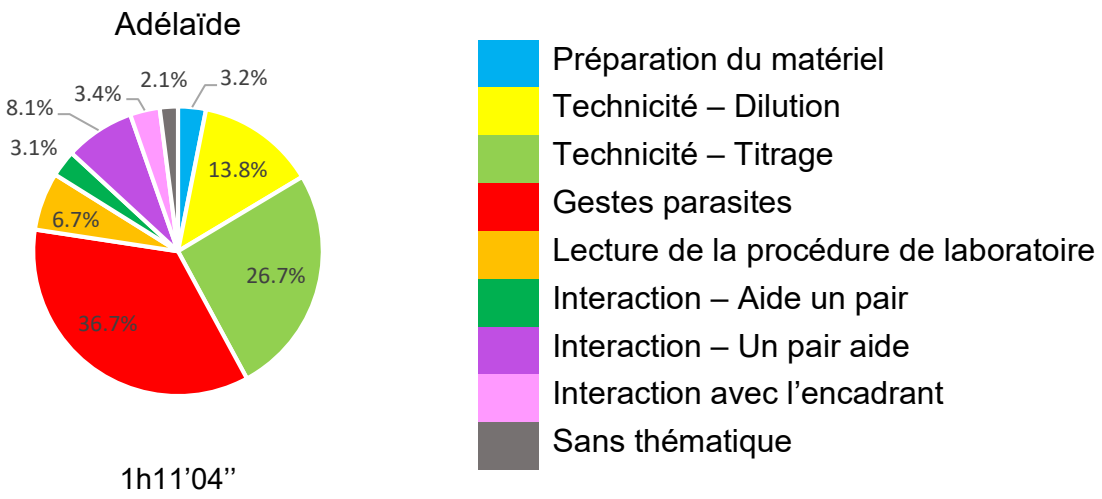
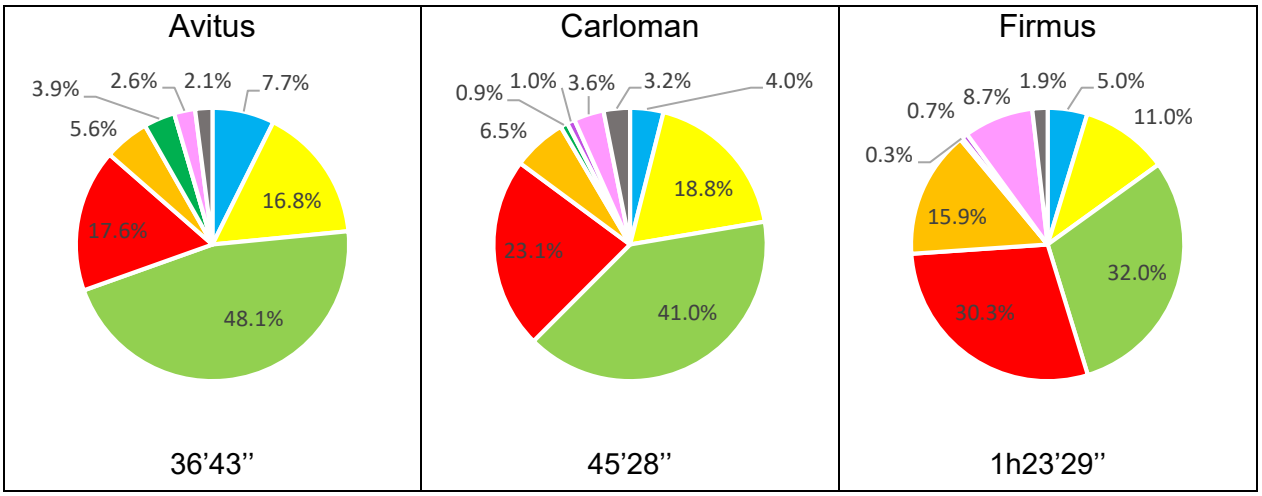


Figure 139 : Exemple de diagramme circulaire représentant la proportion de chacun des gestes lors d'une activité expérimentale

La figure 140 reprend donc la proportion de chaque catégorie de gestes ainsi que la durée de l'activité filmée de certains étudiants lors du TP 4. Les diagrammes de tous les étudiants filmés sont repris en annexe 26. Pour rappel, l'activité filmée reprend la préparation du matériel, la dilution, le titrage rapide et le premier titrage lent. Dans le cadre de ce TP, les étudiants ont à leur disposition un protocole qu'ils ont rédigé eux-mêmes sur base d'outils mis à disposition.



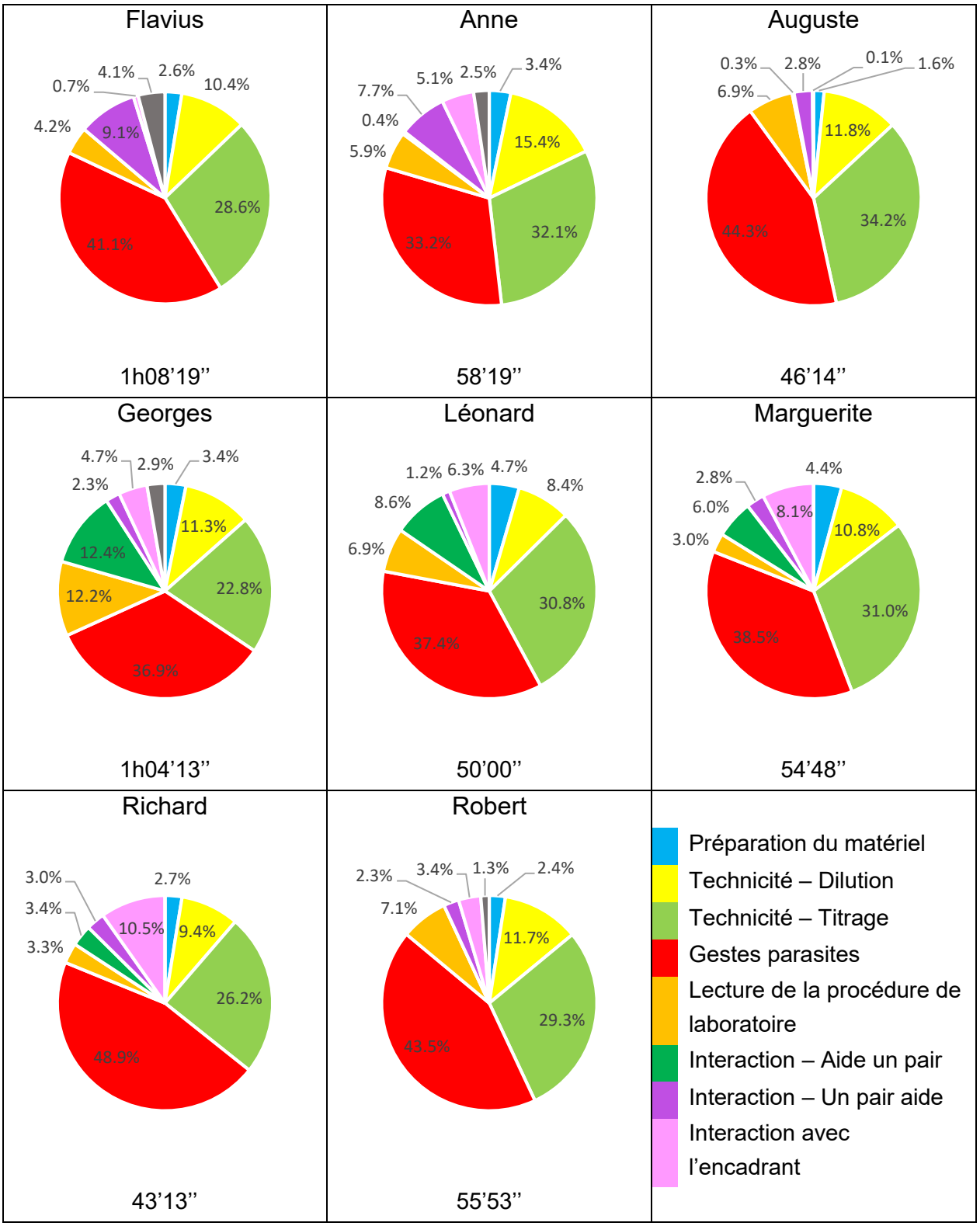


Figure 140 : Proportion des gestes réalisés par les étudiants lors du TP 4

De manière générale, toutes les catégories de gestes sont présentes avec des proportions plus ou moins importantes. Seules deux exceptions peuvent être observées.

Trois étudiants (Léonard, Marguerite et Richard) n'effectuent pas de gestes de la catégorie « Sans thématique ». Etant donné que cette catégorie de gestes regroupe les actes ne pouvant pas être classés dans les autres catégories, il n'est pas étonnant qu'elle ne soit généralement pas la plus représentée. Chez quatre étudiants, l'une ou l'autre partie interactionnelle n'est pas présente dans le cadre de la réalisation de la tâche. Avitus et Robert ne semblent pas avoir eu besoin d'aide de leurs pairs, Flavius n'a pas aidé ou eu l'occasion d'aider un de ses confrères et Auguste n'est jamais entré en contact avec l'encadrant.

Les catégories les plus représentées sont la technicité c'est-à-dire tous les actes liés à la préparation du matériel, à la dilution et au titrage (entre 36,1 et 72,6 % du temps) et les gestes parasites (entre 17,6 et 48,9 % du temps). En ce qui concerne les gestes liés à la technicité, cette observation était attendue du fait de la tâche demandée. Les gestes parasites, quant à eux, sont de différents types :

- des gestes techniques inutiles ;
- des gestes répétés inutilement ;
- des gestes sans lien direct avec la manipulation en cours ;
- des temps d'attente, d'inaction ou l'observation de ce qu'il se passe autour ;
- une réorganisation des objets présents sur la paillasse ;
- des discussions avec d'autres étudiants ou avec l'encadrant sur des sujets sans lien direct avec la tâche à réaliser ;
- …

La proportion de temps passée à consulter la procédure de laboratoire va de 0,5 à 15,9 %. La plupart des étudiants relisent la procédure qu'ils ont rédigée en cours de manipulation.

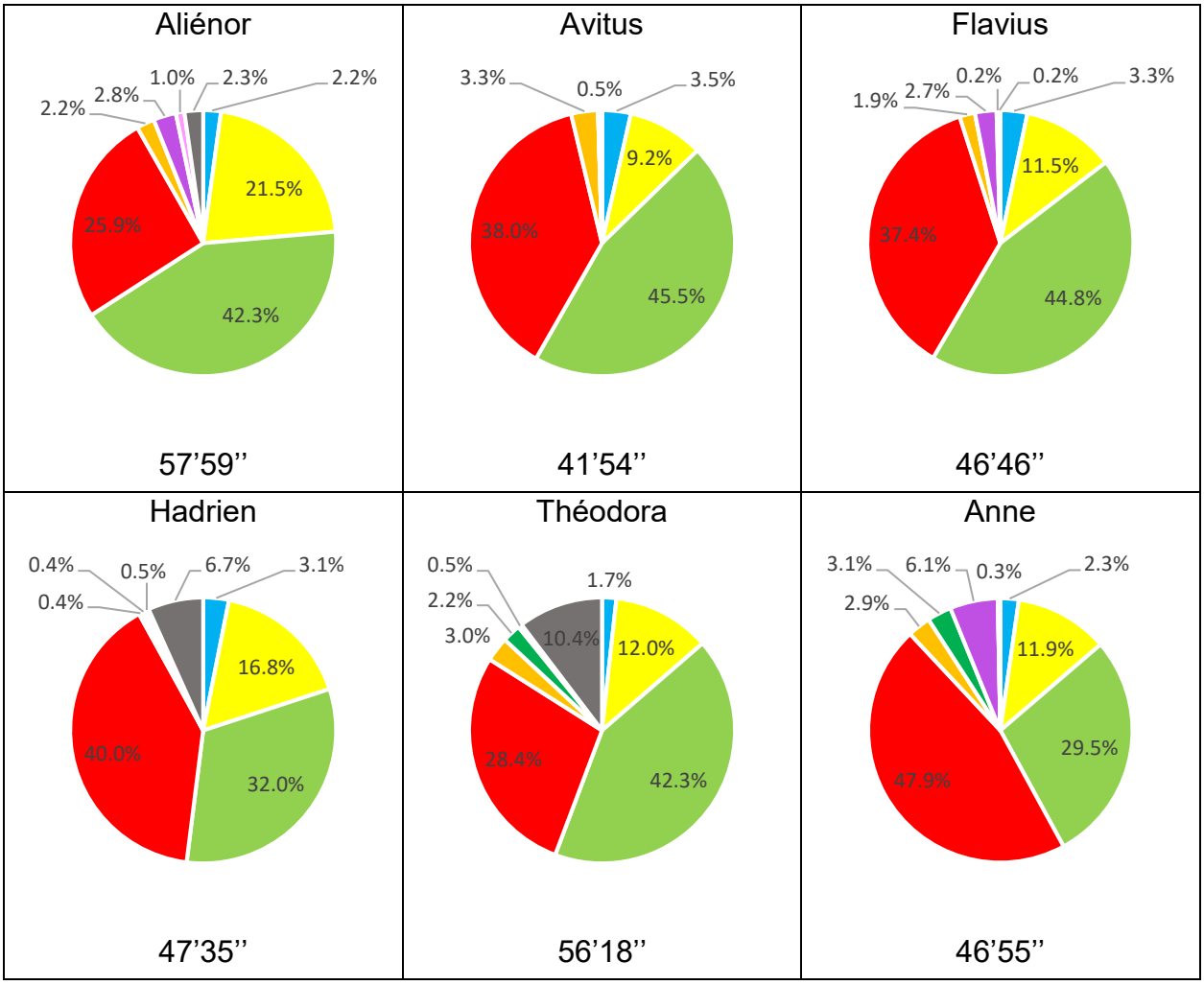
L'analyse de l'activité de chaque étudiant donne des résultats différents tant par la durée de l'activité (de 36'43'' à 1h23'29'') que par les proportions de temps allouées à chacune des catégories. Il arrive que ces résultats reflètent un trait de caractère de l'étudiant. Par exemple, les proportions de temps passées à consulter la procédure de laboratoire et à demander de l'aide à l'encadrant chez Firmus laissent penser que cet étudiant est peu sûr de lui. Georges a tendance à toujours vouloir aider son prochain, comme le confirme la proportion de temps passée à assister ses pairs. Ces résultats peuvent aussi donner une idée de l'état d'esprit dans lequel se trouvait l'étudiant lors de ce TP. Anne et Flavius ont besoin d'être guidé tout le long de l'activité : ils n'apportent d'aide à personne mais consultent leur procédure de laboratoire et font appel à leurs voisins et/ou à l'encadrant de manière régulière. Avitus et Carloman sont tous les deux très à l'aise avec les activités

expérimentales au contraire de Richard qui fait un grand nombre de gestes techniques inutiles.

La description des actes réalisés par les étudiants inscrits en première année d'études en 2017-2018 et 2018-2019 lors du TP 5 ainsi que leur catégorisation se trouvent en annexe 24. Les actions sont, comme dans le cadre du TP 4, morcelées en actes élémentaires par des périodes de prises d'informations et des gestes parasites.

1.2. TP pour lequel le protocole expérimental est fourni (TP 5)

La figure 141 reprend la proportion de chaque catégorie de gestes ainsi que la durée de l'activité filmée de certains étudiants lors du TP 5. Les diagrammes de tous les étudiants filmés sont également repris en annexe 26.



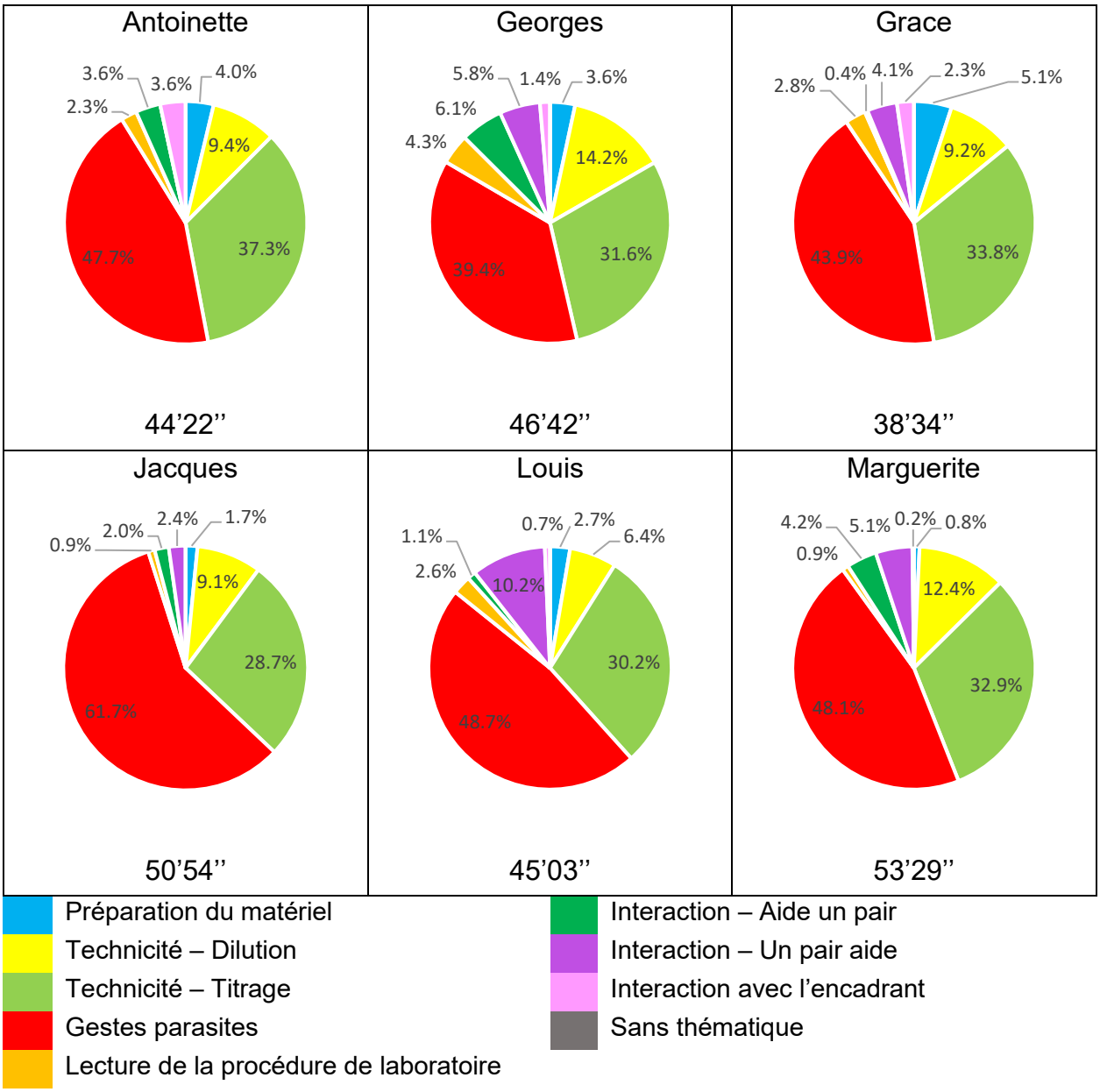


Figure 141 : Proportion des gestes réalisés par les étudiants lors du TP 5

Dans le cadre de ce TP, les étudiants ont accès à une procédure de laboratoire succincte ne reprenant pas les étapes de rinçage et de conditionnement. De plus, il ne fait pas systématiquement mention des pièces de verrerie à employer. La proportion de temps passée à lire la procédure ne dépasse d'ailleurs pas 4,7 %. La lecture du protocole expérimental n'est pas la seule catégorie pour laquelle une différence de proportion avec les diagrammes de la figure 140 peut être constatée. Si une comparaison est faite étudiant par étudiant, c'est le cas pour toutes les catégories d'actes. Généralement, les étudiants passent proportionnellement plus de temps à exécuter des gestes parasites et moins à interagir avec leurs pairs ou leur encadrant. La diminution des interactions avec

l'encadrant est due à un manque de disponibilité de ce dernier. Il n'était en effet pas systématiquement présent auprès des étudiants. En ce qui concerne les gestes parasites, il est probable que, ne trouvant pas l'information dans le syllabus ou auprès de leurs pairs, les étudiants agissent, exécutent des gestes dans le but d'être simplement en mouvement.

De nouveau, les catégories pouvant ne pas être présentes concernent les actes classés dans les classes « Sans thématique » et celles qui impliquent des interactions. Sept étudiants (Avitus, Antoinette, Georges, Grace, Jacques, Louis et Marguerite) ne font aucun acte qui ne puisse pas être classé dans une autre catégorie. L'une ou l'autre catégorie d'actes impliquant d'interagir n'est pas présente chez huit étudiants. Théodora, Anne et Jacques n'ont pas demandé d'explication ou de précision à l'encadrant. Antoinette et Avitus n'ont pas reçu d'aide de leurs pairs ou n'en ont pas eu besoin. Aliénor, Avitus, Flavius et Hadrien ne sont pas intervenus pour aider l'un des autres étudiants. Les catégories les plus présentes sont la technicité (entre 39,3 et 68,4 % du temps) et les gestes parasites (entre 24,5 et 61,7 % du temps).

1.3. Comparaison des proportions des catégories de gestes lors des deux TP de première année

La figure 142 (page ci-après) présente la moyenne des proportions de chaque catégorie pour les deux TP.

La durée moyenne du TP 5 est moins importante que celle du TP 4. La proportion de temps passée sur les gestes techniques est plus ou moins équivalente lors des deux TP et est respectivement de 48,4 et de 51,0 %. Le temps moyen passé sur les gestes techniques est de 28'31'' au TP 4 et de 24'4'' au TP 5. Il est possible que, ayant déjà fait une dilution et un titrage, les étudiants soient plus rapides lors du TP 5. Cette diminution de durée n'est cependant pas principalement due à cela. En effet, comme mentionné dans le chapitre précédent, lors du TP 5, certains gestes techniques ne sont pas réalisés par les étudiants comme certains rinçages et conditionnements. Il n'est dès lors pas étonnant que le temps passé sur les gestes techniques soit réduit et, par conséquent, celle de l'activité.

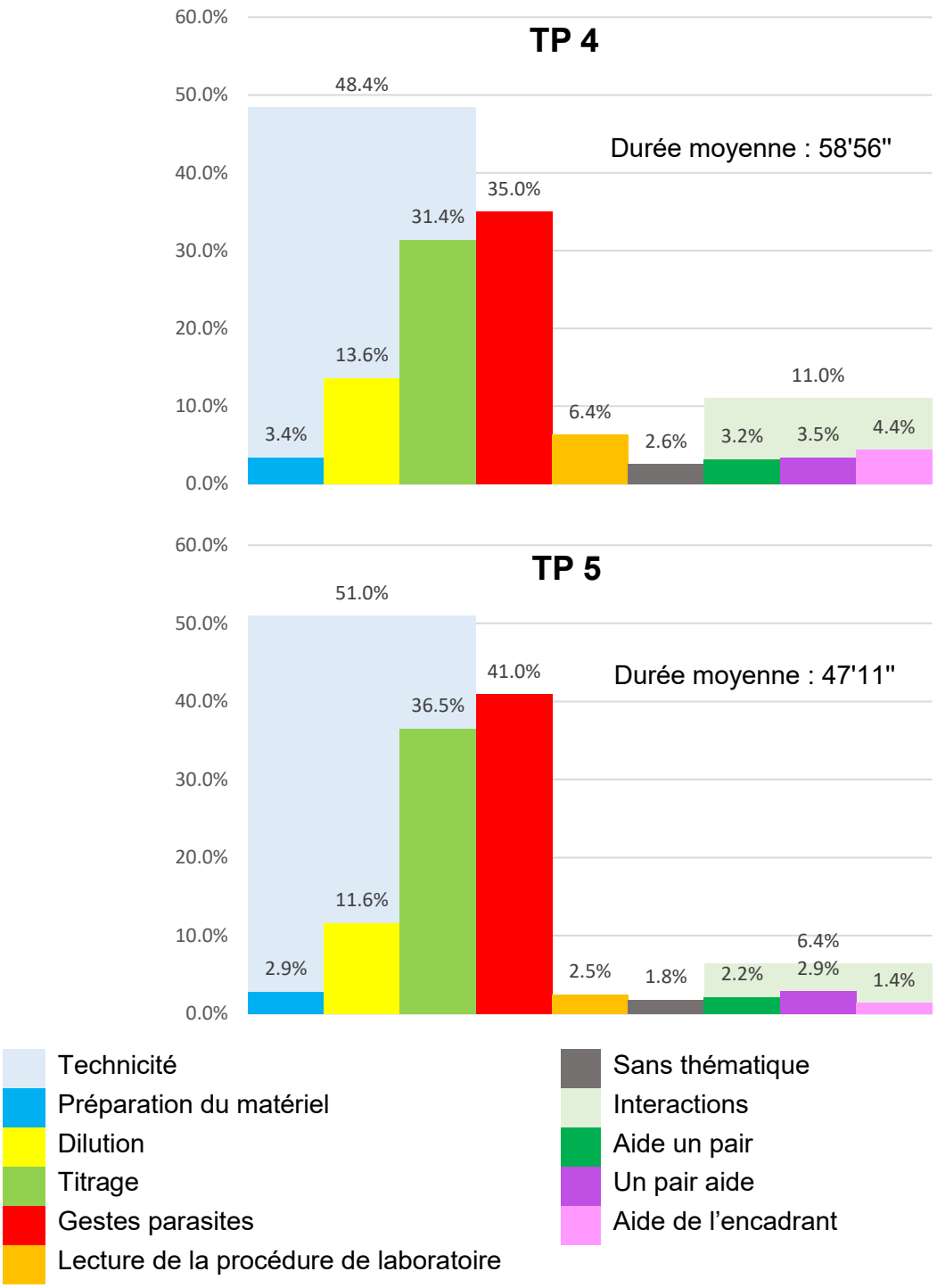


Figure 142 : Moyenne des proportions des catégories de gestes réalisés lors des TP 4 et 5

La proportion de gestes parasites augmente de 35,0 à 41,0 %. Comme la durée de l'activité filmée lors du TP 5 est moins importante, il y a pratiquement autant de temps consacré aux gestes parasites dans les deux TP. Cette augmentation en proportion se fait aux dépens des parties interactionnelles et de la lecture du protocole expérimental.

Cette hausse sur les gestes parasites est donc également un impact de l'absence de protocole détaillé. En effet, généralement, le protocole expérimental est consulté lors d'une recherche ou d'une prise d'informations, de même que les pairs et l'encadrant.
L'impact de la rédaction de ce protocole est forcément visible lors de l'observation des proportions de temps consacrées à sa lecture. Pour rappel, lors du TP4, les étudiants rédigent leur propre procédure de laboratoire. Ils ont tendance à rédiger des procédures très longues et détaillées. La proportion de temps consacrée à la lecture des instructions est donc plus importante que lors du TP 5 pour lequel une procédure concise est fournie car la consultation de cette dernière ne donne que peu de détails techniques.
Les interactions entre pairs dans le cadre de la tâche à effectuer sont moins importantes. Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette observation. Il est possible que, ayant déjà effectué une fois une dilution et un titrage, les étudiants n'aient plus autant de questions à poser. Il se peut aussi que cette diminution des interactions entre pairs soit une conséquence de l'inaptitude de certains étudiants à répondre aux questions des autres étudiants. Ils ont oublié et n'ont pas revu comment effectuer une dilution et un titrage avant d'arriver en laboratoire. Ils ne savent donc pas répondre aux questions techniques posées. Il s'ensuit une diminution des demandes d'informations auprès de ces étudiants.
En ce qui concerne les interactions avec l'encadrant, il s'avère que la diminution de pourcentage observée soit essentiellement due à un manque de disponibilité de ce dernier. Il était en effet moins présent auprès de certains étudiants.

1.4. TP de deuxième année (TP acide ascorbique)

Le même type d'analyse a été fait lors d'un TP de deuxième année impliquant les mêmes techniques de laboratoire. La description des actes réalisés par les étudiants inscrits en deuxième année d'études en 2018-2019 lors du TP de dosage de l'acide ascorbique ainsi que leur catégorisation se trouvent en annexe 25. Les actions sont également morcelées. Ce morcellement est cependant essentiellement dû à des gestes parasites et moins à des périodes de prises d'informations. Les graphes des cinq étudiants qui se sont portés volontaires sont repris à la figure 143 (page ci-après).

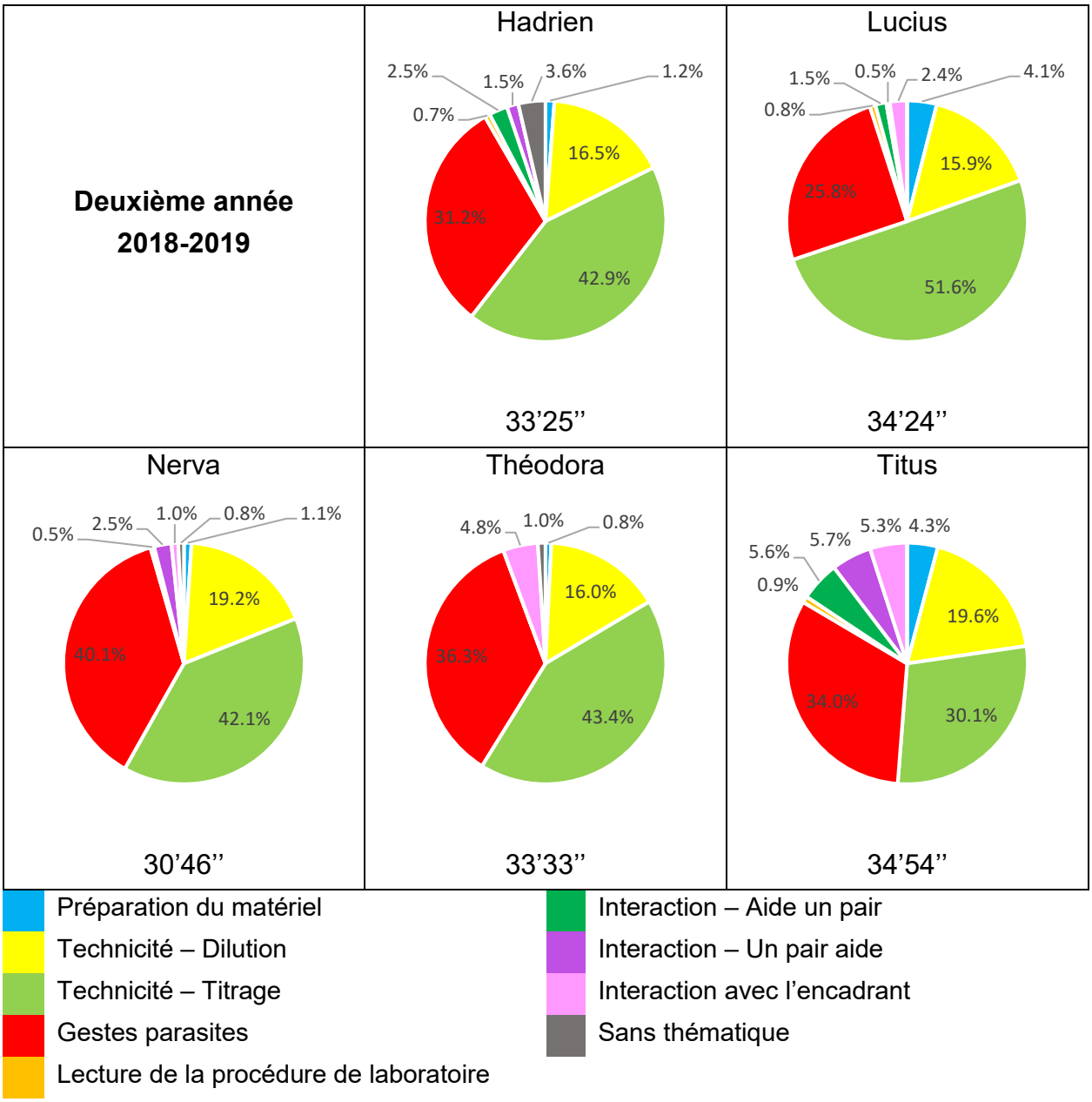


Figure 143 : Proportion des gestes réalisés par les étudiants lors du TP acide ascorbique

Les étudiants de deuxième année ont, dès le début de l'année académique, des TP impliquant une dilution et/ou un ou plusieurs titrages chaque semaine. Le dosage de l'acide ascorbique est leur huitième TP. Malgré leur habitude à réaliser ces deux techniques, il s'avère que la proportion de temps consacrée aux gestes parasites reste importante : de 25,8 à 40,1 % du temps. Les gestes parasites les plus présents ne sont pas tout à fait les mêmes que ceux des étudiants inscrits en première année d'études. Les étudiants discutent plus de sujets sans liens avec le TP et font moins de gestes techniques inutiles. Ils observent également moins ce qu'il se passe autour d'eux. Par

contre, il y a toujours des temps d'arrêt qui sont probablement des moments de réflexion ou de planification des actes à réaliser.

En ce qui concerne les gestes techniques, les pourcentages vont de 54,0 à 71,6 %. Comme attendu, une grande partie du TP reste consacrée aux gestes techniques. Les actes les moins présents sont ceux qui impliquent des interactions dans le cadre de la réalisation du TP. Les demandes d'aide à d'autres personnes sont généralement peu nombreuses et ne concernent, la plupart du temps, pas directement les gestes techniques à réaliser mais portent plutôt sur des valeurs à calculer ou des résultats.

Un autre changement notable concerne la durée de l'activité filmée. Les étudiants ont mis entre 30 et 35 minutes pour effectuer une dilution et deux titrages. Il est cependant à noter que le début du film ne coïncide pas avec le commencement du TP. Avant la partie filmée, les étudiants ont déjà exécuté un titrage leur permettant de déterminer le facteur de dilution nécessaire pour réaliser la seconde partie de la manipulation. C'est la raison pour laquelle l'un ou l'autre rinçage n'est pas observable. Il y a aussi des gestes techniques observables sur les vidéos des étudiants de deuxième année mais pas de première. Les étudiants de deuxième année préparent les solutions à placer sous la burette pour les quatre titrages au même moment. Ils savent qu'ils vont devoir réaliser au moins quatre titrages et prévoient leurs actions en fonction. Les étudiants de première année ont tendance à préparer les solutions une par une. Ils prélèvent les solutions nécessaires au titrage, effectuent le titrage et recommencent par trois fois. Les étudiants de deuxième année prélèvent quatre fois les solutions nécessaires aux différents titrages et effectuent ensuite tous les titrages les uns à la suite des autres. Les vidéos se terminant lorsque les étudiants prennent note du volume de solution à l'équivalence du deuxième titrage, nous voyons la préparation des solutions à placer sous la burette deux fois pour les étudiants de première et quatre fois pour ceux de deuxième. Ces différences entre les gestes techniques réalisés en première et en deuxième ne doivent, selon nous, pas engendrer de grandes variations en termes de proportion de temps consacré à la manipulation. La durée du TP est moins importante en deuxième année car les étudiants savent comment effectuer une dilution et un titrage et sont entraînés. Ils sont par conséquent plus efficaces.

La figure 144 (page ci-après) présente un graphique en bâtonnets des moyennes des proportions de chaque catégorie de gestes réalisés par les étudiants de deuxième année.

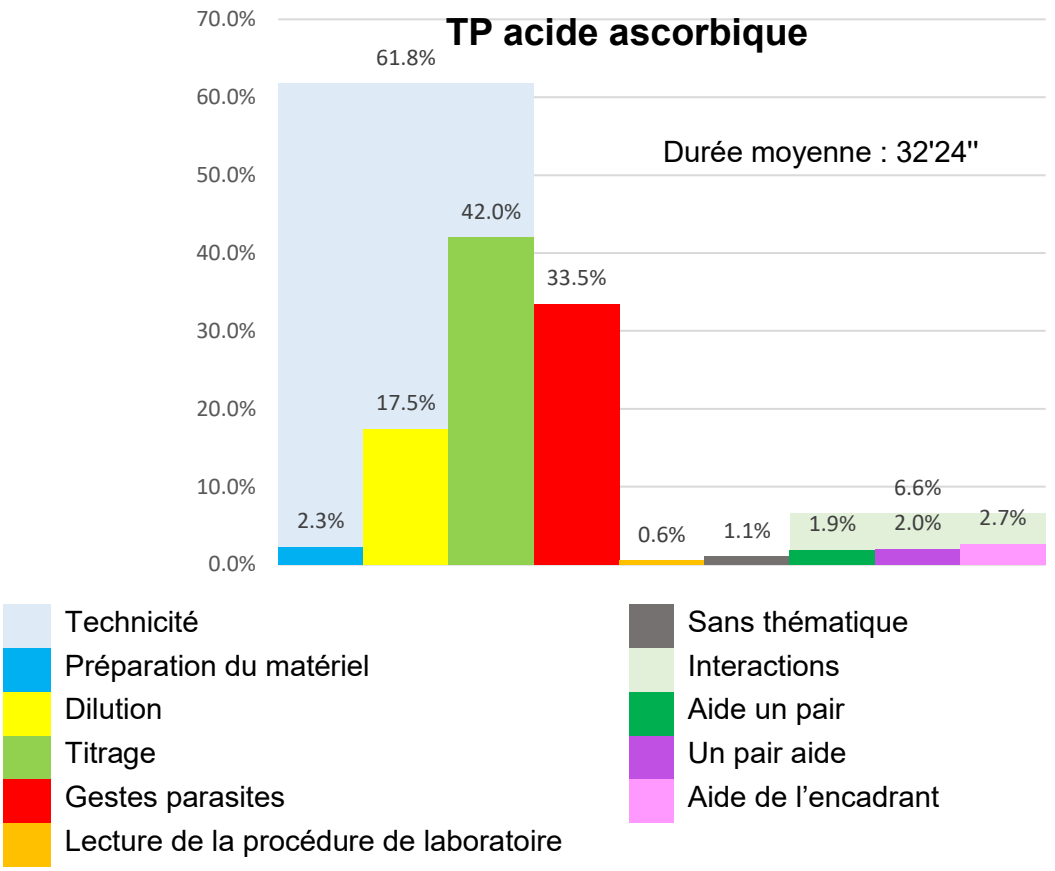


Figure 144 : Moyenne des proportions des catégories de gestes réalisés lors du TP de dosage de l'acide ascorbique en deuxième année

La proportion de temps consacrée aux gestes techniques est presque deux fois supérieure à celle qui est consacrée aux gestes parasites. Globalement, les étudiants passent environ une vingtaine de minutes à manipuler et une dizaine à discuter ou à réorganiser les objets sur leur paillasse. Ils ne consultent pratiquement plus leur procédure de laboratoire. Cette observation est attendue car la procédure est très succincte. Elle ne mentionne que le réactif à doser, éventuellement les composés à rajouter au milieu réactionnel, le réactif titrant et l'indicateur si nécessaire. De plus, après avoir réalisé plusieurs dilutions et titrages tant en première année qu'en deuxième, les étudiants savent normalement exécuter les gestes techniques. Ils n'ont dès lors plus besoin d'une procédure détaillée. Cette dernière idée est d'ailleurs supportée par la faible proportion de temps d'interaction. Comme mentionné précédemment, ces interactions ne concernent pas les gestes techniques en eux-mêmes mais le calcul à effectuer pour connaître le facteur de dilution sur base des valeurs des résultats d'un premier dosage.

1.5. Comparaison des proportions des catégories de gestes lors des TP de première et de deuxième année

Plusieurs observations peuvent être faites si le graphe de la figure 144 est comparé à ceux de la figure 142. Les principales données sont reprises dans la figure 145.

	TP 4		***TP 5***		***TP acide ascorbique***
Durée	58'56''	↘	47'11''	↘	33'24''
Technicité	48,4 %	=	51,0 %	↗	61,8 %
Gestes parasites	35,0 %	↗	41,0 %	↘	33,5 %
Interactions	11,0 %	↘	6,4 %	=	6,6 %
Lecture du protocole	6,4 %	↘	2,5 %	↘	0,6 %

Légende :
Impact de l'apprentissage
Impact de la rédaction du protocole

Figure 145 : Durée, moyennes des proportions des principales catégories d'actes et évolution lors des TP de première et de deuxième année

La durée de l'activité filmée diminue de la première à la deuxième année. Les étudiants de deuxième année mettent moins de temps que ceux de première pour effectuer une tâche similaire. Il semble évident que des étudiants ayant effectué cette tâche plusieurs fois soient plus efficaces que des novices. Les gestes sont réalisés plus rapidement et plus adéquatement par les étudiants plus expérimentés. Cela est d'ailleurs supporté par la comparaison des pourcentages des temps passés sur les gestes techniques. La technicité occupe un volume horaire plus important chez les étudiants de deuxième année aux dépens de la lecture du protocole de laboratoire. En cours de deuxième année, les étudiants ne consultent la procédure que de manière épisodique, essentiellement pour prendre connaissance des réactifs et autres substances à employer ainsi que certaines quantités ou volumes.

Il n'y a pas de diminution notable de la proportion de temps consacrée aux interactions si ce n'est entre les deux TP effectués par les étudiants de première année. La partie interactionnelle diminue lors du TP 5 car, entre autres choses, les étudiants ont déjà réalisé une tâche similaire. Malgré des pourcentages sur les actes interactionnels

pratiquement identiques pour les TP 5 et acide ascorbique, la nature des échanges n'est pas la même. Lors du TP 5, les étudiants posent des questions d'ordre technique. Lors du TP acide ascorbique, les questions posées sont plus d'ordre calculatoire.

Il n'y a pas non plus de diminution de la proportion de temps consacrée aux gestes parasites mais, tout comme les interactions, les types de gestes parasites changent légèrement. En deuxième année, les étudiants discutent plus de sujets sans lien avec la manipulation et font moins de gestes techniques inutiles que les étudiants de première année.

Si les données de la figure 145 sont observées de manière globale, une constatation supplémentaire peut être faite. En classant les catégories de gestes par ordre décroissant de proportion de temps, la répartition est toujours la même quel que soit le TP :

1. la technicité ;
2. les gestes parasites ;
3. les interactions ;
4. la lecture du protocole.

Les fonctions des gestes techniques, des interactions et de la lecture du protocole peuvent en partie être devinées ou, tout au moins, supposées. Qu'en est-il des gestes parasites ? Leur importance quelle que soit l'avancée dans le cursus laisse envisager qu'ils doivent avoir, en toute logique, du sens, une raison d'être pour les étudiants. Dans la suite de ce travail, nous nous sommes intéressés aux raisons évoquées par les étudiants pour expliquer leurs actes en laboratoire.

2. Les ressources employées par les étudiants

2.1. Les entretiens d'autoconfrontation

Les étudiants ayant accepté de participer à un entretien d'autoconfrontation sont Agnès, Catherine, Georges, Grace et Léonard suite au TP 4 ; Anne, Antoinette, Jacques et Louis suite au TP 5 et Hadrien, Nerva, Théodora et Titus suite au TP acide ascorbique. Les entretiens des étudiants réalisés à l'occasion du TP 4 sont repris en annexe 27, ceux effectués à l'occasion du TP 5 en annexe 28 et ceux des étudiants de deuxième année en annexe 29.

Les témoignages obtenus lors des entretiens ne correspondent pas toujours à l'action effectuée, la pensée des étudiants n'étant pas linéaire. Lorsque les étudiants se voient exécuter une action, il arrive qu'ils parlent d'un geste réalisé auparavant ou expliquent déjà une action future. Par exemple, au moment où Agnès ajuste le niveau de solution dans la burette pour la première fois à la graduation zéro, elle explique : « *Là, je me dis*

« Je ne vais jamais arriver au trait de jauge, je vais… » Parce qu'il est trop bas, ben ça ne… C'est pas précis. Du coup, j'ai demandé au prof pour aller chercher une chaise. Mais là, le liquide n'est pas encore monté mais je me dis « Je ne vois pas mon trait. Si je suis trop bas, ça ne sera pas droit. Il n'y aura pas de tangente de faite vu que je suis plus bas. Je suis en contre-bas donc ça n'ira pas. » Je me dis « Ça ne va pas être précis ». Et je n'aime pas ça, quand je fais quelque chose… Du coup, je suis allée embêter le prof. Il m'a dit « Tu vas faire ça comme ça ». J'ai dit « Non. Je ne ferai pas ça comme ça. ». Et puis, il m'a dit … « Oui. Si tu veux, tu peux prendre la chaise mais fais attention de ne pas tomber. ». Et moi, j'étais contente parce que j'avais ma chaise. » (Extrait 349). Dans cet extrait, elle résume déjà ce qu'il va se passer plus tard.

De plus, le vécu est souvent plus riche en informations que la seule partie perceptible de l'activité. Lors des entretiens d'autoconfrontation, les étudiants sont amenés à revenir sur leur vécu et à le mettre en récit. Le contenu de ce récit fait souvent appel à d'autres éléments que ce qui reste perceptible comme le souvenir d'un travail réalisé, d'un événement, d'une sensation, d'un sentiment, le rappel d'un principe, … et parfois plusieurs de ces éléments pour la même action. Ainsi, dans l'extrait 199, alors qu'il se voit homogénéiser la solution alors que le ballon jaugé n'est pas rempli, Hadrien explique qu'il doit bien faire cela pour des raisons scientifiques mais aussi pour éviter de perdre des points : « *Bien homogénéiser ma solution. Donc là, c'est ça. C'est quelque chose qui peut apporter beaucoup d'erreurs. Là, par contre, j'essaie d'être bien sûr que tout soit bien mélangé parce que sinon on a … le liquide qui doit réagir en-dessous et l'eau au-dessus. Si on ne verse que de l'eau et puis après que du liquide qui doit réagir, ça sera mal fait et cela va vraiment apporter beaucoup d'erreurs sur les résultats. Donc ça, c'est un truc que je fais systématiquement. Je mélange avant pour être bien sûr que ce soit mélangé et après je vais mettre jusqu'au trait. Et ensuite, je vais remélanger encore. On me verra, une fois que j'aurai mon bouchon, je le renverserai comme ça pour être bien certain que tout soit homogène. Parce qu'il y a un labo précédent où cela m'était arrivé, où j'avais pas bien fait ça et j'ai perdu beaucoup de points parce que justement j'avais pas bien mélangé dans mon ballon. Et donc, cela m'a servi de leçon. Maintenant, systématiquement, je fais ça.* »

Du fait de cette richesse, il n'a pas toujours été possible de faire correspondre le témoignage des étudiants avec l'action visionnée sur les vidéos. Ils parlent parfois de plusieurs actions en même temps ou expriment des éléments valables pour plusieurs actions. Pour ces mêmes raisons, nous ne pouvions pas nous baser sur le contenu des entretiens pour recatégoriser les gestes effectués du point de vue de l'étudiant. De plus, les entretiens sont riches mais leur contenu ne couvre pas toute l'activité du fait du temps

imparti pour l'entretien. Il ne permet également pas toujours de déterminer la catégorie dans laquelle classer le geste effectué. La cause en est que les étudiants parlent de leur vécu sans forcément justifier leurs gestes. Nous avons donc considéré l'activité comme un tout.

2.2. Les ressources évoquées par les étudiants lors des entretiens

Les entretiens avec les étudiants révèlent l'impact d'un grand nombre d'objets, d'artéfacts sur l'activité. Parmi ces artéfacts, nous avons choisi, comme angle d'analyse, les référents évoqués par les étudiants. Nous appelons référent tout élément ou personne susceptible de fournir une information ou aide à l'étudiant. Parmi ces référents, il y a :

- des ressources didactiques et pédagogiques comme la procédure de laboratoire, le matériel ou des vidéos mises à disposition ;
- des ressources humaines telles que l'encadrant, l'enseignant précédent, les pairs ou l'étudiant lui-même ;
- les règles de sécurité en laboratoire.

L'étudiant utilise la procédure de laboratoire lorsqu'il dit regarder dans son syllabus, penser à son mode opératoire, aller consulter le tableau, … ou qu'il explique la raison pour laquelle il lit la procédure mais sans la mentionner car l'action est visible sur la vidéo. Les vidéos techniques mises à disposition, par contre, doivent être citées spécifiquement, n'étant pas présentes lors des entretiens.

Nous classons dans « matériel » toutes les pièces de verrerie, de matériel ou de substances dont l'étudiant va se servir pour en inférer l'utilisation ou pour expliquer un événement survenu lors de la séance de laboratoire. Par exemple, Titus explique qu'il a oublié d'ajouter l'indicateur et qu'il va s'en apercevoir en regardant la couleur de sa solution en cours de titrage. Antoinette se rend compte qu'elle s'est trompée de pièce de verrerie pour faire la dilution grâce à la taille et la forme du morceau de parafilm censé la refermer. Anne explique qu'elle ne doit pas utiliser une pipette jaugée pour remplir la burette car il lui faudrait monter sur un tabouret pour ce faire. Il y a encore bien d'autres exemples.

L'étudiant utilise l'encadrant comme référent lorsqu'il dit appeler l'assistant ou le professeur ou qu'il explique la raison pour laquelle il l'a appelé sans le mentionner spécifiquement. Il arrive en effet, tout comme pour la procédure de laboratoire, que l'étudiant ne stipule pas le référent car il est visible sur la vidéo servant de base à l'entretien. Il est à noter que le souvenir de ce qu'aurait dit un encadrant lors d'une séance de TP antérieure n'est pas considéré comme une utilisation du référent « encadrant ». Ce souvenir fait maintenant partie de l'étudiant lui-même. Il ne fait pas appel à l'encadrant

lors de l'activité. Par exemple, Nerva explique qu'il se rappelle qu'il faut retirer la propipette de la pipette pasteur après utilisation car une encadrante le lui a dit lors d'un TP antérieur. C'est un geste acquis. Il sait pourquoi il est nécessaire de le faire. Il n'a plus besoin de l'encadrant lors de l'activité sur laquelle porte l'entretien.

Les autres étudiants peuvent aussi servir de référent à un étudiant particulier. Quand un étudiant se pose une question, il arrive fréquemment qu'il demande de l'aide à l'un de ses pairs.

Les dernières ressources humaines utilisées comme référent sont les étudiants eux-mêmes et l'enseignant précédent. Lors des séances de laboratoire, les étudiants n'arrivent pas vierges de toute connaissance. Ils peuvent alors exécuter un geste appris d'un enseignant d'une année antérieure ou qu'ils connaissent de par leur propre travail ou leur formation en secondaire. L'étudiant s'utilise lui-même comme référent lorsqu'il parle en « je » et explique son geste sans faire appel à d'autres référents. Lors des entretiens, l'étudiant utilise des expressions comme « je dois », « je me demande », « je peux », « je me dis », « je fais », « faut pas que », … Dès que l'étudiant ne cite pas expressément un autre référent, il est considéré comme le sien propre.

Le dernier référent utilisé par certains étudiants est constitué des règles de sécurité en laboratoire. Par exemple, Georges y fait référence pour expliquer qu'il retire ses bracelets en cours d'activité.

Tous ces référents ne sont pas utilisés à la même fréquence. La figure 146 (page 325) montre la fréquence d'utilisation des différents référents lors des entretiens d'autoconfrontation faisant suite aux trois TP.

Le référent le plus présent lors des entretiens est l'étudiant lui-même. Il est cependant nécessaire de souligner que, dès que l'étudiant disait faire un acte sans mentionner de référent particulier, nous avons considéré qu'il était lui-même son propre référent. Il exécute l'acte car il pense devoir le faire. Les étudiants ne mentionnant pas systématiquement le référent employé, les pourcentages liés au référent « soi » sont très élevés. Il est remarquable que les étudiants, au fur et à mesure de l'avancée dans leur cursus, font de plus en plus appel à leurs acquis ou connaissances pour réaliser les TP.

Lors du TP4, le deuxième référent le plus cité dans les entretiens est la procédure de laboratoire. Dans le cadre de ce TP, les étudiants ont dû rédiger leur propre protocole. Etant donné que, pour la plupart d'entre eux, c'était la première fois qu'ils exécutaient une dilution et un titrage, les procédures sont, pour un nombre élevé d'étudiants, très détaillées. En cours d'activité, ils ont donc tendance à la consulter dès qu'ils passent à une étape suivante ou qu'ils doutent de ce qu'ils doivent faire. Lors du TP 5, les étudiants emploient nettement moins la procédure. Il est possible que les étudiants en aient moins

besoin car ils ont déjà réalisé une dilution et un titrage. Une autre raison peut être évoquée : la procédure est beaucoup plus succincte que ce qu'ils ont rédigé lors du TP précédent. Elle comporte donc moins d'informations techniques. En deuxième année, les étudiants ont accès à une procédure ne mentionnant que les réactifs et les conditions pour effectuer la manipulation. Aucun geste technique n'est décrit. Le pourcentage de mention de la procédure de laboratoire diminue donc encore.

Le troisième référent le plus utilisé par les étudiants lors du TP 4 est constitué de leurs pairs. Ces derniers sont également fortement employés lors du TP 5 durant lequel les étudiants tentent de pallier au manque d'informations présentes dans la procédure fournie et à l'indisponibilité, pour certains, de l'encadrant. En ce qui concerne le TP 4, les étudiants discutent beaucoup entre eux, essentiellement de détails techniques. Pour la majorité d'entre eux, c'est la première fois qu'ils emploient certaines pièces de laboratoire. Ils demandent donc à leurs voisins comment faire tel ou tel geste ou ce qu'il faut faire suite à une observation ou un problème rencontré. Parfois, il s'agit simplement de se rassurer. Les étudiants de deuxième année ne posent pas de questions techniques à leurs pairs. Dans leur cas, les demandes concernent plutôt des calculs à effectuer pour déterminer leur facteur de dilution.

Le référent suivant est l'encadrant. Lors des TP 4 et 5, il est appelé ou intervient, tout comme les pairs, sur des gestes techniques ou pour résoudre des problèmes rencontrés. Il est moins mentionné lors du TP 5 car, comme écrit précédemment, l'encadrant a manqué de disponibilité auprès de certains des étudiants. Lors du TP acide ascorbique, l'encadrant n'intervient que sur les éventuels problèmes que peuvent rencontrer les étudiants pour calculer le facteur de dilution et pour fournir un surplus de l'une des solutions nécessaires à la manipulation. Son utilité est plus limitée dans le cadre d'une activité de laboratoire pour laquelle les étudiants connaissent les gestes techniques à exécuter.

Le matériel est un référent employé presque autant au TP 4 qu'au TP 5. Dans ces deux TP, les étudiants observent le matériel pour en déduire l'utilisation ou résoudre un problème. Il est possible que, la procédure n'étant pas très détaillée et l'encadrant pas toujours disponible, les étudiants tentent de se rappeler des gestes à réaliser sur base, en plus de leurs souvenirs du TP précédent, de ce qui est mis à leur disposition. Comme décrit plus tôt, ils emploient également leurs pairs pour ce faire. En deuxième année, le matériel est utilisé pour expliquer une erreur commise en laboratoire. Quand une solution n'a pas la teinte qu'elle devrait avoir, l'étudiant se rend compte qu'il a oublié d'ajouter l'indicateur coloré, par exemple.

Les derniers référents auxquels font appel les étudiants de première année lors des TP 4 et 5 sont les vidéos techniques mises à disposition. Dans le cadre du TP 4, certains s'en sont servis pour rédiger leur protocole de laboratoire. Pour rappel, ces vidéos ne montrent pratiquement que des gestes techniques sans expliciter toutes les raisons pour lesquelles ils sont exécutés. Les étudiants ne les citent d'ailleurs que dans le cadre de gestes techniques. En deuxième année, les étudiants ont déjà fait un certain nombre de dilutions et de titrages. Ils n'ont plus besoin de référents autres qu'eux-mêmes pour justifier leurs actes d'un point de vue technique.

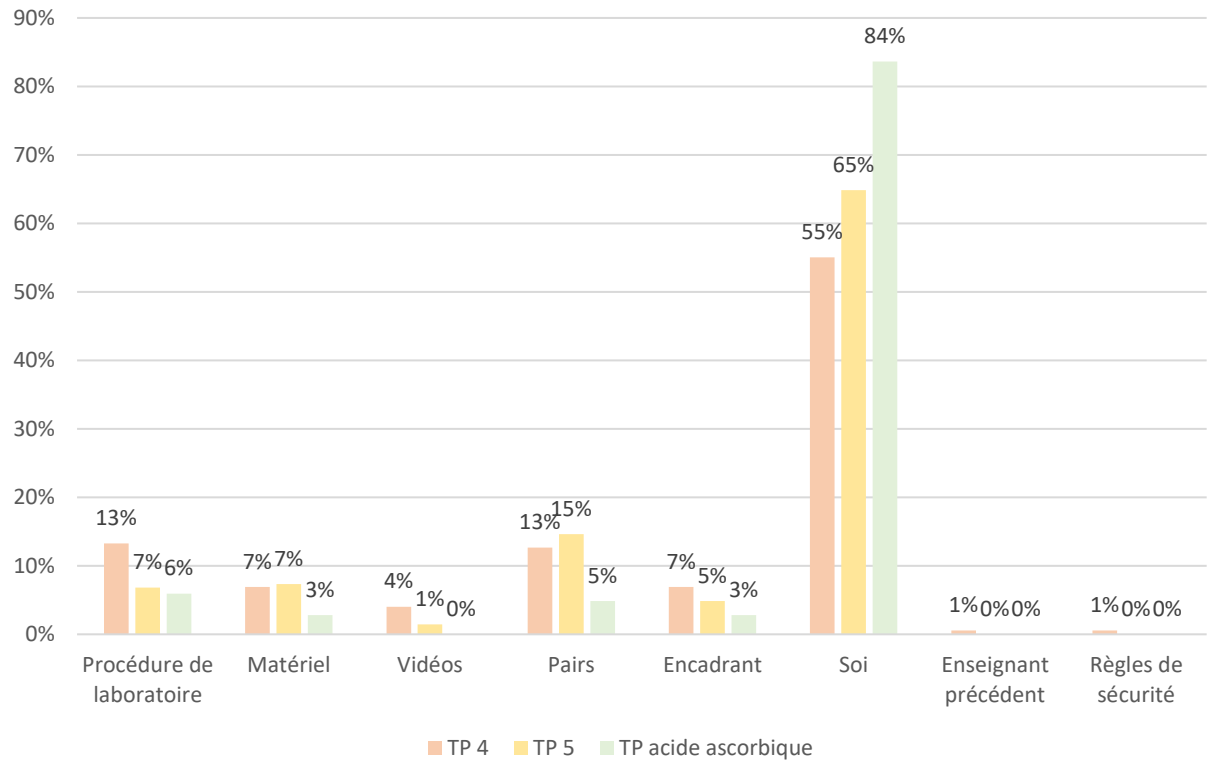


Figure 146 : Pourcentages d'évocation des différents référents par les étudiants lors des entretiens

Les résultats obtenus lors des entretiens viennent donc corroborer ceux du chapitre précédent lors de l'étude de l'impact du protocole. La diminution du degré de détail des protocoles s'accompagne, en première année, d'une augmentation de l'emploi des pairs et du matériel comme référents.

La figure 147 (page ci-après) résume les résultats présentés supra.

	TP 4 – TP 5	***TP 5 – TP acide ascorbique***
Ressources didactiques et pédagogiques		
Le protocole	↘	↘
Le matériel	=	↘
Les vidéos	↘	↘
Ressources humaines		
L'étudiant	↗	↗
Les pairs	↗	↘
L'encadrant	↘	↘

Légende :
Impact de l'apprentissage
Impact de l'indisponibilité de l'encadrant et/ou d'un protocole détaillé

Figure 147 : Evolution de l'emploi des principaux référents

Les derniers référents que sont l'enseignant précédent et les règles de sécurité en laboratoire ne sont cités que de manière anecdotique. Il n'en sera plus fait mention dans la suite de ce travail.

2.3. Mise en tension des ressources

Les référents sont employés pour justifier l'un ou l'autre acte et sont parfois mis en tension. Il y a mise en tension lorsqu'un étudiant fait appel à plusieurs référents sur l'exécution d'un acte particulier lors de l'activité. L'un des référents est alors choisi par l'étudiant aux dépens du ou des autres. Ces mises en tension entre référents ont généralement lieu chez les étudiants de première année. Cela peut être en partie expliqué par le nombre de référents utilisés en première plus important que ce même nombre en deuxième.

Par exemple, Agnès met en tension ce que lui dit de faire l'encadrant avec ce qu'elle pense faire lorsqu'elle demande une chaise pour ajuster la solution à la graduation zéro de la burette. L'encadrant lui propose de placer le statif supportant la burette sur le bord de la paillasse et de faire glisser la burette vers le bas jusqu'à ce que la graduation zéro soit à hauteur des yeux. Elle n'est pas très sûre que ce soit la bonne solution. Pour elle, le montage ne serait pas très stable. La burette risque de tomber et de casser. Elle insiste donc pour avoir une chaise. Catherine met aussi deux référents en tension lorsque sa voisine lui dit de nettoyer la burette avec la solution à titrer et que, n'étant pas sûre de cela, elle consulte la procédure de laboratoire. Elle choisit de suivre la procédure décrite

dans son écrit. Georges, lorsqu'il décide de retirer tous ses bracelets mais laisse sa montre, met le référent « règles de sécurité » en tension avec ce qu'il pense. Les règles de sécurité interdisent les bijoux en laboratoire. Il retire donc ses bracelets. Il laisse sa montre car il estime qu'elle lui est utile et que les substances utilisées en laboratoire ne sont pas si dangereuses que ça. Le dernier exemple cité ici concerne Grace. Dans les vidéos, il est expliqué que, pour diluer des acides concentrés, il faut mettre l'eau avant l'acide. Après avoir réalisé une première dilution du vinaigre, Grace se demande si elle doit mettre un fond d'eau avant de mettre l'acide ou pas. Elle vide la solution qu'elle a préparée pour la refaire en respectant le fait de mettre l'acide dans l'eau et pas le contraire. Elle le fait en sachant que sa première solution a été faite correctement. Son idée est de respecter la procédure de laboratoire. Elle met les vidéos et la procédure de laboratoire en tension avec ce qu'elle pense.

Du point de vue des étudiants, il est possible qu'il y ait un classement des référents, que certains référents aient une préséance sur d'autres. Ce classement est probablement variable d'un étudiant à l'autre et peut-être également d'une situation à une autre.

3. Les fonctions remplies par les actes que les étudiants réalisent en laboratoire

Les référents ne sont donc pas utilisés de manière équivalente. Ils ne le sont pas non plus pour les mêmes raisons. Les référents remplissent différentes fonctions :

- agir non étayé ;
- agir étayé ;
- réguler ses actes (régulation) ;
- planifier (planification) ;
- se situer dans le temps (curseur temporel) ;
- investiguer (support à l'investigation) ;
- respecter des normes (conformité) ;
- ne pas faire certains actes (économie de gestes) ;
- se resituer dans la manipulation (balise) ;
- apprendre (apprentissage) ;
- éviter de faire appel à l'encadrant ;
- éviter de faire appel aux pairs ;
- éviter de poser des questions (obtention d'informations par d'autres canaux) ;
- respecter les règles de sécurité ;
- éviter le gaspillage ;

- quitter la tâche (mise en suspens de la tâche).

Les fonctions ont été définies sur base d'éléments présents dans les entretiens.
Les entretiens sont très riches en informations. Dans la suite de cet écrit, nous ne citons pas tous les exemples qui y sont présents.
Les numéros des extraits cités correspondent aux numéros présents dans la retranscription des entretiens pour chacun des étudiants. Ces numéros sont parfois entre parenthèses.

3.1. L'agir non étayé

La première de ces fonctions est l'agir non étayé. C'est l'action pour l'action. Il s'agit des actes d'ordre purement opérationnels. Ils exécutent le geste pour le geste, qu'il soit technique ou parasite. Par exemple, Georges (74) explique qu'il faut tenir le bécher incliné et la pipette verticalement pour prélever car il l'a vu dans les vidéos. Il décrit un geste technique réalisé ou à réaliser. Anne (192) dit qu'elle conditionne une pipette jaugée avec un réactif qui n'a pas besoin d'être dosé. Elle décrit un geste parasite. Elle ne se rend pas compte que, n'étant pas à doser, il n'est pas utile de le prélever avec un instrument de précision. Georges et Anne sont des étudiants de première année. En deuxième année aussi l'un ou l'autre étudiant exécute un geste parasite sans forcément s'en rendre compte. Ainsi, Titus transvase une trop grande quantité d'un réactif censé être mis en excès pour le dosage dans un cylindre gradué. Il élimine le surplus alors que cela n'aurait eu aucune influence sur ces résultats s'il avait tout utilisé pour le dosage. Il dit simplement, dans l'extrait 402 « *Oui. Ça, c'est quand il y en a beaucoup trop* ». Ils ne se rendent généralement pas compte qu'ils exécutent un geste parasite même lors de l'entretien si ce n'est dans certains cas particuliers. Ainsi, Grace se rend compte pendant l'entretien qu'elle n'avait pas besoin de recommencer une dilution car la première solution qu'elle avait préparée avait été faite correctement. Elle ajoute, dans l'extrait 136, qu'étant au calme et pas au laboratoire, elle peut plus facilement réfléchir. Anne se rend compte qu'elle effectue trop de rinçages. Dans son cas, ce n'est pas la réflexion sur son vécu mais la répétition des gestes qui lui en fait prendre conscience.
Tout comme les gestes parasites, certains étudiants de première année expliquent être conscients d'erreurs commises durant l'activité et d'autres pas. Ainsi, par exemple, Louis (527) explique qu'il a dépassé l'équivalence du titrage. Il va cependant prendre note du résultat. Agnès (232) dit qu'elle a lavé et essuyé une pièce de verrerie pour rien car elle n'allait pas convenir. Il arrive parfois qu'ils prennent conscience de l'erreur après l'activité voire durant l'entretien. Anne (133 à 143) dit qu'elle a dépassé le trait de jauge lors du remplissage du ballon jaugé et que, pour avoir le bon volume, elle a retiré le surplus à

l'aide d'une pipette pasteur. Elle dit qu'il ne faut pas retirer le surplus comme elle l'a fait car elle enlève, par la même occasion, un peu de la quantité de matière à diluer.

Lors des entretiens, les étudiants décrivent ce qu'ils font sans justification scientifique à l'acte quel que soit le TP ou l'année d'étude. Dans ce cas, l'étudiant se sert de lui-même comme référent, à l'exemple de Hadrien qui dit, dans l'extrait 166 « *… Je faisais bêtement un conditionnement. Donc, il faut juste prendre un peu de produit et laver la verrerie avec le produit et puis le jeter*. ». Ils peuvent aussi expliquer qu'ils font ce qui est écrit dans la procédure ou ce qu'un encadrant ou un pair leur a dit de faire. Les étudiants de première année utilisent la procédure de laboratoire qu'ils ont écrite dans le cadre du TP 4 essentiellement pour connaître les détails techniques, pour savoir quelles substances utiliser, en quelle quantité et quelles pièces de verrerie utiliser. Ainsi, Catherine (147) explique qu'elle consulte son protocole pour savoir quoi mettre dans la burette et en quelle quantité.

Pour les étudiants, la procédure de laboratoire est d'une grande importance, comme le laissent penser les propos tenus par Grace. Elle a effectué une dilution en mettant le vinaigre avant de compléter au trait de jauge du ballon jaugé avec de l'eau. Dans son écrit, il est noté que, pour diluer des acides concentrés, il faut ajouter un peu d'eau dans le ballon avant d'y mettre l'acide. Elle jette donc la solution préparée pour recommencer car elle se dit, dans l'extrait 126, qu'il faut respecter le mode opératoire. Lors du TP 5, la procédure de laboratoire est nettement moins détaillée que ce que la plupart des étudiants ont écrit dans le cadre du TP 4. Les étudiants ne cherchent donc plus de précisions sur les gestes techniques à réaliser. Il en est de même pour les étudiants de deuxième année mais pour une autre raison : ils n'en ont plus besoin. Ils parlent d'ailleurs plusieurs fois d'habitude, d'automatisme, … comme Hadrien dont voici l'extrait 190 : *« … Mais euh là, c'est un indicateur coloré. C'est un truc que l'on fait à chaque labo, plusieurs fois par laboratoire. C'est un mouvement automatique. Je n'y réfléchis pas vraiment.* ». La procédure ne sert plus qu'à s'informer des substances à employer et, parfois, des quantités à prélever. Hadrien l'explique dans l'extrait 114 « *… je suis en train de lire justement la suite de ma manipulation. Donc, je suis en train de regarder qu'est-ce que je vais devoir mettre dans la burette qui est là*. ». En deuxième année, la consultation du protocole concerne plus des particularités de la manipulation à effectuer que l'exécution de gestes techniques.

Dans le cas d'un agir non étayé, l'encadrant et les pairs sont essentiellement utilisés pour une aide technique. Par contre, ils ne sont pas employés en deuxième année pour remplir cette fonction. Les étudiants demandent des informations et font généralement ce qui est dit. L'extrait 148 de l'entretien avec Léonard est assez explicite. Il va poser une question

à son voisin de derrière et dit, lors de l'entretien : « *En revenant, je me suis dit que s'il fait comme ça, bah, je vais faire comme ça aussi* ». Dans le même ordre d'idée, Catherine (46) explique qu'elle a observé ses pairs pour savoir quel instrument utiliser pour faire un prélèvement à la pipette. Il y a un exemple impliquant l'encadrant dans l'entretien avec Agnès. Dans l'extrait 384, elle demande le nombre de titrages à effectuer à l'encadrant qui lui confirme qu'il faut faire un rapide et trois lents sans en justifier la raison.

Les étudiants se posent également beaucoup de questions en cours d'activité. Elles portent sur :

- le fait de devoir exécuter un geste technique ou pas ;
- la manière d'effectuer un geste technique ;
- les instruments, les pièces de verrerie à utiliser ;
- les substances à employer.

Les étudiants de deuxième année ne se posent plus ces questions si ce n'est la dernière à l'instar d'Hadrien dans l'extrait 77 « *En fait, j'étais en train de me dire « Quel est le produit que je vais devoir mettre dans les quatre récipients qui sont le principal… enfin le centre de ma manipulation ? ». Et donc je me suis dit « Quel produit je vais devoir mettre dedans ? ». Et là, on me voit d'ailleurs mettre un peu la main vers l'étagère…* ». Le référent employé est l'étudiant lui-même. C'est aussi le cas pour les étudiants de première année quel que soit le TP envisagé.

Les étudiants de première année expriment aussi durant l'entretien avoir eu des difficultés à exécuter certains gestes techniques comme, par exemple, Agnès. Dans l'extrait 63, elle explique qu'elle a du mal à conditionner la pipette malgré les explications présentes dans les vidéos. Les étudiants utilisent donc, dans ce cadre, les vidéos, le matériel, les pairs et l'encadrant. Il arrivait d'ailleurs que ce dernier exécute l'acte posant problème à la place de l'étudiant. L'encadrant va, par exemple, faire partir la bulle d'air de la partie effilée de la burette d'Agnès (343).

Il y a encore un grand nombre de situations d'agir non étayé mais elles sont particulières au vécu de l'étudiant interrogé. Elles sont dues à son environnement, à son vécu personnel, … Par exemple, Nerva (332), quand il transvase une solution dans un cylindre gradué, se dit que la pièce employée est faite pour les droitiers parce qu'il doit toujours la retourner pour pouvoir lire la valeur du volume. Grace (32 et 36) raconte qu'elle a dû aller choisir un tablier et qu'elle a eu du mal à en trouver un à sa taille.

Un grand nombre de gestes effectués par les étudiants ne sont pas supportés par un raisonnement mais par des informations ou indications données par des référents. Ces gestes peuvent être de techniques, parasites ou même être des erreurs. Les étudiants expliquent le geste tel qu'ils l'ont fait et, parfois, se rendent compte qu'ils ont

exécutés un geste inadéquat ou inutile que ce soit durant l'activité elle-même ou durant l'entretien.

3.2. L'agir étayé

Un agir étayé est défini comme une action que l'étudiant justifie, auquel il donne un but, qui a un sens. Les référents employés sont divers : la procédure de laboratoire, le matériel, l'encadrant, les pairs et l'étudiant lui-même.

Les entretiens révèlent que les étudiants, lors de l'activité, connaissent le but scientifique de certains de leurs gestes. Ainsi, Agnès (246), Catherine (20), Georges (69), Léonard (47), Antoinette (122), Théodora (22) et Titus (110) expliquent qu'il faut conditionner la pipette jaugée ou la burette pour éliminer les traces d'eau issues du précédent rinçage ou pour qu'il n'y ait que la solution d'intérêt sur les parois intérieures. Agnès (355), Grace (268), Antoinette (231 à 235), Nerva (272) et Titus (440 à 442) disent que l'objectif du titrage rapide est d'avoir une idée du volume de titrant à ajouter. Certains ajoutent que cela permet de verser une grande partie du volume lors du titrage lent et d'éviter ainsi de tout faire au goutte à goutte. Il y a encore bien d'autres exemples où l'étudiant justifie ses actes scientifiquement durant l'entretien. Le référent utilisé dans les cas présentés supra est l'étudiant lui-même. Il peut cependant aussi faire appel à d'autres référents.

Cela peut être la procédure de laboratoire que les étudiants ont rédigée. Par exemple, Léonard (182) explique qu'il a lu qu'une feuille de papier blanche mise sous l'erlenmeyer pouvait aider à la visualisation de l'équivalence.

Ils peuvent également avoir une justification de l'encadrant comme Agnès et Antoinette. Agnès (205) explique qu'elle demande à l'encadrant dans quelle pièce de verrerie verser la solution diluée préparée. Il répond qu'il faut en mettre une partie dans un bécher avant de prélever pour éviter une contamination de la solution. Antoinette, quant à elle, a oublié de faire partir la bulle d'air de la partie effilée de la burette. L'encadrant intervient en lui expliquant la raison pour laquelle il est nécessaire de le faire. Elle explique, dans les extraits 171 à 175, qu'elle a appris quelque chose.

Les étudiants donnent également une justification à leur agir lorsqu'ils poursuivent un but utilitaire. Ils font preuve de pragmatisme. Par exemple, Agnès (349) demande une chaise à l'encadrant pour éviter de commettre une erreur de parallaxe lors du remplissage de la burette. Elle explique qu'elle est trop petite pour voir la graduation zéro située en haut de la burette de face. Elle explique également dans l'extrait 87 qu'elle tapote la pipette pour faire partir les gouttes qui restent dedans. Dans le même ordre d'idée, Louis dit, dans les extraits 103 à 106, qu'il tapote la pipette pour essayer de faire partir des

bulles. En deuxième année, Hadrien raconte (258) qu'il met une solution de la même couleur que celle qu'il doit obtenir en fin de titrage à côté de l'erlenmeyer dans lequel il l'effectue pour pouvoir comparer les couleurs. Les entretiens sont parsemés de ce type de justifications purement pragmatiques. Dans les cas présentés, ce sont les étudiants qui prennent le rôle de référent. Il arrive que le référent soit plutôt le matériel. Les étudiants mentionnent alors ses propriétés ou son fonctionnement à l'instar de Georges et Léonard. Georges a mis la solution à titrer dans un bécher au lieu d'un erlenmeyer. Il souhaite transvaser cette solution dans l'erlenmeyer. Il explique, dans l'extrait 376, qu'il est plus facile de mélanger la solution dans cette pièce de verrerie car elle possède un goulot plus fin. Léonard (70) dit qu'il a renfoncé la pompe à crémaillère sur la pipette car, lorsqu'il essayait de prélever, la solution coulait, elle ne restait pas dans la pipette. Ils ont une vision utilitaire du matériel.

La justification donnée peut aussi être d'éviter un problème ou une erreur. Par exemple, Catherine pose une question concernant ce qu'elle doit mettre sous la burette lors de son remplissage. Elle explique, dans l'extrait 204, que sa voisine lui a dit qu'il était préférable de ne pas mettre la solution à titrer directement sous la burette au cas où le robinet serait ouvert. En effet, le titrant coulerait alors directement dans la solution, faussant ainsi les résultats du titrage. Dans l'extrait 347 de son entretien, Agnès explique qu'elle met un bécher sous la burette au moment du remplissage pour cette même raison. Dans les extraits 243 à 245, Louis dit laver un erlenmeyer car il y a un fond brunâtre dont il craint une réaction avec l'un des réactifs à mettre dedans. Ces actes ont tous pour objectif d'éviter un problème ou de commettre une erreur pouvant avoir des conséquences sur les résultats. Les référents utilisés sont essentiellement les étudiants eux-mêmes et leurs pairs.

Durant les activités expérimentales, des gestes parasites sont effectués. Il arrive que les étudiants justifient ces gestes parasites. Le référent est alors systématiquement eux-mêmes. Par exemple, Agnès (434), Georges (277) et Antoinette (82) essuient l'erlenmeyer ou le bécher dans lequel ils vont effectuer le titrage en expliquant que c'est pour éviter de diluer la solution à titrer. En effet, un titrage a pour but de déterminer la concentration d'une solution. S'il y a de l'eau dans l'erlenmeyer ou le bécher dans lequel on transvase la solution à titrer, cette dernière sera diluée. En réalité, ce n'est pas la concentration que l'on détermine mais la quantité de matière. Cette dernière donne accès à la concentration mais n'est pas influencée par la quantité d'eau qui serait présente ou ajoutée. Antoinette s'en rend d'ailleurs compte en cours d'entretien et l'exprime dans les extraits 98 et 100. Ce ne sont pas les seuls exemples et cela arrive également en deuxième année. Hadrien homogénéise la solution issue de la dilution pendant à peu

près cinq minutes. Il explique, dans les extraits 199 et 219, qu'il doit bien homogénéiser la solution en retournant le ballon jaugé pour éviter qu'il n'y ait un gradient de concentration, quitte à continuer à manipuler d'une seule main. Effectivement, il est nécessaire de bien homogénéiser la solution mais, généralement, retourner le ballon jaugé entre trois et cinq fois suffit. Il apparaît donc que, parfois, les gestes parasites revêtent, pour les étudiants, le statut de geste technique. Ils leur donnent donc une justification.

A contrario, les étudiants exécutent des gestes ou pensent les exécuter sans réfléchir, sans penser au but de l'acte à entreprendre. L'encadrant ou un pair intervient pour une mise au point. Par exemple, l'encadrant répond à une question d'Agnès qui demande si elle doit vider la burette entre chaque titrage. Dans l'extrait 440, elle précise la réponse qu'elle a reçue de l'encadrant « *Non, non. Tu peux rajouter. C'est toujours la même substance*. ». De même, le voisin de Louis intervient lorsque ce dernier veut vider l'eau se trouvant dans un ballon jaugé. Dans l'extrait 169, Louis dit qu'il lui a fait remarquer que la présence d'eau dans un ballon jaugé lors d'une dilution ne change rien. En effet, il faut rajouter de l'eau pour le remplir. Dans ces cas, les personnes interviennent, font une remarque permettant à l'étudiant d'éviter un geste parasite, un geste qui n'aurait pas de sens. En deuxième année aussi des gestes sont exécutés sans qu'il n'y ait de réflexion mais, comme mentionné précédemment, la raison en provient des automatismes acquis par les étudiants.

Il y a une observation qui n'a été faite qu'en deuxième année. Elle est due à la tâche. Lors de l'activité, les étudiants sont amenés à effectuer des calculs, à chercher des valeurs. Ces dernières impactent la technique à exécuter. Hadrien parle ainsi du facteur de dilution à calculer dans l'extrait 87. Ce facteur va permettre de déterminer la contenance de la pipette jaugée et du ballon jaugé destinés à la dilution. Il dit aussi, dans l'extrait 251, qu'il laisse couler le titrant dans l'erlenmeyer jusqu'à une valeur théorique qu'il a calculée. Il effectue en fait un titrage lent. Il se base sur son calcul pour éviter de faire le titrage rapide.

Ainsi, les gestes effectués et explicités par les étudiants poursuivent un but scientifique, pragmatique ou permettent d'éviter un problème, de commettre une erreur. Cependant, il est à noter que ces gestes ne sont pas forcément des gestes reconnus dans la tâche prescrite. Il peut s'agir de gestes parasites.

3.3. La régulation

Lors des entretiens, les étudiants utilisent aussi des référents pour se rassurer, pour vérifier que l'acte posé ou qu'ils pensent poser est adéquat. Cette fonction est appelée régulation.

Il y a régulation sur les actes à poser. Dans ce cas, les référents sont la procédure de laboratoire, l'encadrant, les pairs et l'étudiant lui-même. Les étudiants les consultent pour savoir ce qu'il faut faire ou lorsqu'ils ont des doutes sur la conduite à tenir. Agnès (22 et 36) dit vérifier dans la procédure de laboratoire qu'elle effectue ou va effectuer les gestes techniques adéquats. Il en est de même pour Catherine (41, 69 et 129), Léonard (51), Anne (127 et 201), Hadrien (116), Nerva (51 et 112 à 116) et Théodora (24). Léonard (172) ajoute qu'il consulte la procédure de laboratoire pour vérifier qu'il ne commet pas d'erreur, pour éviter de recommencer. Dans l'extrait 203, Agnès dit aussi interpeller l'encadrant dans ce but. Hadrien (31) dit également avoir tendance à faire appel à l'encadrant dès qu'il a un doute et Nerva (238) à ses pairs.

A l'instar de Nerva, certains étudiants se servent également de leurs pairs pour se rassurer, faire une vérification. Léonard (18-20) explique qu'il observe les autres pour voir s'ils font la même chose. Il ajoute « *Si les autres font ça, on se dit que c'est bon si on fait la même chose* ». Agnès et Hadrien expriment aussi cette idée respectivement dans les extraits 77 et 291.

L'étudiant s'utilise lui-même comme référent lorsqu'il s'agit de vérifier qu'un acte a bien été exécuté. Ils disent alors s'assurer de l'avoir fait en le refaisant. Ainsi en est-il d'Agnès (165 et 191) et Titus (219) qui vérifient plusieurs fois qu'ils ont correctement ajusté au trait de jauge lors du remplissage du ballon jaugé. Titus (467) fait une autre action une seconde fois : l'ajout d'indicateur dans l'un des erlenmeyers destinés au titrage. Il le fait suite à un oubli. Anne (296) relit la valeur du volume obtenu à l'équivalence d'un titrage. Enfin, Nerva (110) rince une seconde fois le ballon jaugé.

Toujours dans l'esprit d'une vérification, les étudiants emploient la procédure de laboratoire, leurs pairs ou eux-mêmes pour s'assurer d'utiliser le matériel et les solutions adéquats comme Agnès (16), Catherine (10-12), Anne (175) et Titus (219), d'exécuter la manipulation ou un geste technique plus spécifique correctement à l'exemple d'Agnès (77, 89 et 167), de Catherine (170 et 198), Léonard (102) et Hadrien (62, 98 et 247-249) et de prendre note des bonnes valeurs, d'avoir les bons résultats à l'instar de Nerva (312 et 372).

Pour s'assurer d'avoir les valeurs les plus exactes possible, les étudiants comparent leurs résultats à ceux de leurs pairs ou à des valeurs qu'ils ont calculées.

Jacques (311-313) et Titus (294) vont ainsi se servir de leurs pairs pour avoir une idée de la valeur du volume à l'équivalence de leur titrage. Léonard (202) dit avoir estimé la valeur du volume à obtenir avec ses voisins. Hadrien fait également appel à ses voisins lors du calcul du facteur de dilution. Dans l'extrait 250, Il dit prédire par calcul la valeur du volume à l'équivalence du titrage. Il vérifie ensuite que les valeurs obtenues et calculées sont concordantes (265).

Les étudiants régulent aussi leurs actions grâce à des questions qu'ils posent ou qui leur sont posées. Par exemple, Agnès (313) explique que les questions posées par l'encadrant la rassurent dans ce qu'elle fait. Un peu plus tard lors de l'entretien, elle (367) cite de nouveau l'encadrant en disant « *si je demandais au prof, j'en étais sûre* ». Il arrive également que les étudiants posent des questions dont ils connaissent la réponse à leurs pairs ou à l'encadrant comme Grace (325) et Hadrien (256). Ils le font pour se rassurer.

Les différents référents employés ont une fonction de régulation lorsque les étudiants ont un doute ou ne savent plus exactement ce qu'il faut faire, ne savent plus s'ils ont réalisé l'un des gestes ou pas, comparent leurs résultats, posent des questions dont les réponses leur sont connues, …

3.4. La planification

Les étudiants expriment aussi que certains actes sont exécutés dans un but logistique. Nous avons appelé cela de la planification.

Ils planifient, organisent leurs actes. Les actes peuvent être de différents types. Il y a des actes manipulatoires, techniques. Dans ce cas, les étudiants utilisent la procédure de laboratoire, leurs pairs et eux-mêmes comme référents. Ils disent regarder ou réfléchir à ce qu'ils doivent faire par la suite ou se refaire la procédure en tête comme Agnès (36), Catherine (81), Grace (64), Jacques (66), Hadrien (211), Nerva (18), Théodora (5, 30 et 104) et Titus (64). Anne (11) ajoute qu'elle fait cela pour ne rien oublier. Agnès (169) et Hadrien (174) expliquent également préparer le matériel nécessaire.

Il y a aussi des actes calculatoires. Ces derniers ne sont effectués que par les étudiants de deuxième année. Par exemple, Hadrien (86) dit réfléchir aux calculs à faire pour déterminer le facteur de dilution alors qu'il continue à manipuler. Théodora explique prévoir de faire le calcul du facteur de dilution dans l'extrait 41 ainsi que le nombre de titrages qu'elle peut réaliser avec la quantité de solution diluée qu'elle a préparée dans l'extrait 91.

Il y a également des actes effectués par les étudiants en vue de rédiger le rapport ou de remplir le cahier de laboratoire par la suite. Par exemple, Antoinette, dans l'extrait 236, explique qu'elle prend note des valeurs d'incertitude de chacune des pièces de verrerie

utilisée parce qu'une question présente dans le rapport nécessite de les connaître. Dans l'extrait 129, Hadrien dit préparer son cahier de laboratoire de manière à ne plus avoir qu'à noter les valeurs obtenues.

Certains étudiants de deuxième année prévoient également les observations qu'ils sont censés faire lors de la manipulation. Hadrien (54) dit imaginer la fin de la manipulation dans le but de débuter correctement. Nerva (225) explique faire tout le cheminement de la manipulation pour connaître le changement de couleur qu'il aura à repérer lors des titrages.

Trois étudiants de deuxième année, Hadrien (176), Nerva (119) et Théodora (102) parlent de parties de manipulation qui prennent du temps. Certains actes sont réalisés dans le but d'en gagner, que ce soit en première ou en deuxième année. Par exemple, Georges (322 et 324), Léonard (205), Louis (264), Hadrien (164) et Titus (39) disent utiliser un bécher dans lequel ils mettent tous leurs déchets pour éviter de se rendre systématiquement près de la tourie de récupération. Antoinette (233) et Titus (480) expliquent qu'un titrage rapide permet d'éviter de laisser couler le titrant au goutte à goutte et, ainsi, de gagner du temps pour effectuer les titrages lents par la suite.

Ils parlent également de gain ou de perte de temps par rapport aux actes posés, à ce qu'ils ont prévu de faire. Par exemple, Agnès dit qu'elle ne veut pas perdre de temps à « *chipoter* » et qu'elle va faire ce que lui dit sa voisine dans l'extrait 234. Louis (282) ne veut pas rincer la pipette jaugée parce qu'il n'avait pas le temps de tout faire. Hadrien, dans l'extrait 31, explique qu'il est préférable de faire appel à l'encadrant s'il a un doute pour éviter de perdre du temps à recommencer. Titus (270) dit préparer les quatre erlenmeyers à la fois en prévision des quatre titrages pour gagner du temps. De cette manière, il ne doit pas recommencer entre chaque titrage.

Dans le but de gagner du temps, certains étudiants vont aussi effectuer des calculs pour prévoir la valeur du volume à l'équivalence à l'instar d'Antoinette (188), Hadrien (250) et Nerva (281) ou demander à leurs pairs la valeur obtenue comme Anne (112) et Louis (402). Un étudiant se servant d'un résultat obtenu d'un pair ou ayant prévu les valeurs à obtenir peut en profiter pour passer certaines étapes comme ici le titrage rapide et dire gagner du temps.

La planification apparaît également sur les tables de travail. Les étudiants agencent les différents éléments sur leur espace de travail en prévision d'un acte à poser. Par exemple, l'encadrant intervient chez Agnès pour lui dire de garder la chaise lui permettant d'éviter de faire une erreur de parallaxe lors de l'ajustement à la graduation zéro de la burette car elle va encore en avoir besoin. Elle explique cela dans l'extrait 359. Hadrien (224) approche la verrerie sale de l'évier en vue d'effectuer la vaisselle. Titus, dans

l'extrait 174, dit retirer la poire à pipeter de la pipette car il va l'utiliser par la suite sur une autre pipette.
Cette organisation peut également concerner le matériel et les solutions sans qu'aucun acte ne soit prévu. Il s'agit alors juste d'éviter de se tromper ou, dans le cas des solutions, de les confondre. En ce qui concerne le matériel, il s'agit surtout d'éviter de le ranger. Les étudiants posent un objet utile à la manipulation à un endroit défini. Ils savent ainsi où ils l'ont posé et ne doivent pas chercher après au moment de l'utiliser. Agnès va poser la pipette jaugée avec laquelle elle a prélevé la solution à diluer car elle prévoit de la réutiliser lors des titrages. Nerva (187) agit de même avec le barreau magnétique destiné à mélanger les solutions en cours de titrage. Les étudiants s'organisent surtout au niveau des solutions. Un grand nombre d'étudiants s'en préoccupent : Agnès (137, 264 et 306), Catherine (179), Georges (172, 322 et 324), Jacques (250), Louis (219 et 221) et Hadrien (100). Agnès y regarde plusieurs fois. Elle se remet en mémoire où se situent les solutions, notamment le bécher qu'elle utilise comme poubelle.
Dans le but de s'organiser, les étudiants nettoient et rangent le matériel. Ainsi, Hadrien, dans l'extrait 228, dit ranger la propipette pour éviter de la perdre et parce qu'il n'en aura plus besoin. Grace (316) et Léonard (156) disent ranger les récipients ou le matériel inutilisé pour éviter de se tromper. Catherine (136) dit laver, essuyer et ranger un bécher pour une éventuelle réutilisation.

Les étudiants vont planifier certains de leurs actes pour savoir quoi faire à quel moment, prévoir un travail futur, gagner du temps, éviter de se tromper, … Cette fonction de planification semble être d'une plus grande importance pour les étudiants de deuxième année. En effet, les acquis d'apprentissage ne sont pas les mêmes. Il est attendu de ces étudiants d'être capable de mener à bien une manipulation avec un minimum d'informations. Ils doivent prévoir une éventuelle dilution, un temps d'attente due à une cinétique plus lente lors d'un titrage, …

3.5. Le curseur temporel

Certains référents sont également employés pour se situer dans le temps. Ils servent de curseurs temporels.

Les étudiants expliquent qu'ils sont à l'avance, en phase ou en retard dans leur(s) manipulation(s) en les mentionnant. Par exemple, Léonard, dans l'extrait 18, explique qu'il regarde autour de lui pour savoir s'il est en avance ou en retard par rapport aux autres. Les pairs constituent alors le référent consulté. Agnès et Anne, respectivement dans les extraits 208 et 218, comparent leur avancée à celle de leurs pairs. Elles disent que leurs voisins respectifs sont plus avancés qu'elles.

Dans le cas de Nerva, c'est plutôt l'encadrant qui sert de référent. En effet, ce dernier intervient à un moment donné pour dire aux étudiants qu'ils devraient en être à tel ou tel stade de la manipulation. Dans l'extrait 289, Nerva dit qu'il est en retard s'il se réfère à l'encadrant.

Les étudiants parlent aussi d'avoir du retard lorsqu'ils doivent recommencer tout ou partie de la manipulation. Ainsi en est-il de Catherine et Grace qui doivent toutes les deux recommencer la dilution. Catherine a dépassé le trait de jauge lors du remplissage du ballon jaugé. Pendant l'entretien, elle dit devoir accélérer car elle doit recommencer (130).

Grace a confondu le bécher dans lequel elle met les déchets, les solutions à jeter et le bécher contenant la solution à titrer lors de l'ajustement à la graduation zéro de la burette. Au lieu de mettre le bécher destiné aux déchets en-dessous, elle a mis celui qui contient la solution à titrer c'est-à-dire la solution issue de la dilution. Elle doit donc la recommencer. Elle exprime, dans les extraits 281 et 299, sa crainte d'être en retard par rapport aux autres étudiants.

Parfois, cette crainte d'être en retard entraîne la décision de ne pas recommencer. L'étudiant continue alors la manipulation comme si de rien n'était et/ou falsifie ses valeurs. C'est ce que fait Louis après avoir raté son premier titrage. Il explique, dans l'extrait 484, que ses voisins et lui étaient « *à la bourre* » et qu'il n'avait pas le temps de recommencer.

Les étudiants parlent aussi de la durée de la séance de laboratoire. Ils disent avoir le temps comme Grace dans l'extrait 218 ou, au contraire, d'être « *chronométré* » comme Hadrien dans l'extrait 54. Pour se situer dans le temps, certains étudiants consultent d'ailleurs leur montre ou une horloge. C'est ce que dit faire Georges pour justifier qu'il ne retire pas sa montre en laboratoire dans l'extrait 300. Titus, lui, consulte l'horloge pour savoir s'il a le temps de recommencer une dilution (329).

Les référents servent de curseurs temporels lorsque les étudiants ressentent le besoin de se situer dans le temps de la manipulation ou qu'ils doivent en recommencer tout ou partie.

3.6. Le support à l'investigation

Lorsqu'ils rencontrent un problème ou font une observation, les étudiants peuvent aussi utiliser les référents comme support à l'investigation pour trouver une solution ou une explication.

Lorsqu'il s'agit de la résolution d'un problème, toutes les ressources, qu'elles soient matérielles ou humaines sont utilisées sauf les vidéos. Les problèmes rencontrés peuvent

concerner la technicité, l'organisation, la détection d'erreur et leur correction, l'obtention de résultats inexacts, … Tous les problèmes rencontrés par les étudiants ne seront pas abordés dans ce paragraphe au vu de leur diversité. Parmi ces problèmes, citons, par exemple, celui de Grace. Lors de l'ajustement à la graduation zéro de la burette, elle confond le bécher contenant les déchets et celui qui contient la solution à titrer. Elle verse donc un peu de titrant dans la solution à titrer. Cela a pour impact de faire diminuer la concentration de la solution à titrer puisqu'une partie de la quantité de matière a réagi. Elle prélève un peu de solution à titrer en vue d'effectuer le dosage et commence à douter de ce qu'elle fait. Elle l'exprime dans l'extrait 297. Elle va alors tenter de trouver une solution pour savoir si elle a effectivement confondu les béchers ou pas. Dans l'extrait 305, elle dit consulter le protocole mais ne rien trouver pouvant l'aider. Dans l'extrait 310, elle dit demander de l'aide à l'encadrant. Ce dernier lui propose de faire un titrage rapide. Dans le cadre de la préparation de cette séance de laboratoire, les étudiants devaient déterminer la concentration de la solution à titrer avant dilution ainsi que le facteur de dilution à appliquer pour que cette solution soit dosée à l'aide d'un titrant de concentration donnée. Ils peuvent donc avoir une idée de la valeur du volume de titrant à ajouter pour atteindre l'équivalence. L'encadrant propose à Grace de vérifier par titrage si elle obtient bien ce volume. Il s'avère qu'elle s'était bien trompée. Elle a donc dû recommencer. Pour résoudre ce problème, Grace a fait appel à elle-même, à la procédure de laboratoire et à l'encadrant comme référents dans le but de trouver une solution.

Les étudiants, lorsqu'ils manipulent, peuvent rencontrer un autre type de problème. Ils se posent des questions sur le fonctionnement du matériel. Ils vont alors demander de l'aide aux pairs, chercher par eux-mêmes et, parfois, trouver en observant ou en manipulant ce matériel. Par exemple, Catherine et Léonard se sont demandés comment fonctionne la pompe à crémaillère, comment l'utiliser. Catherine commence par essayer de manipuler la pipette et la pompe (54). Ne trouvant pas, elle demande à ses voisines. L'une d'entre elles l'aide (56). Léonard commence de la même manière que Catherine mais, lui, découvre le fonctionnement par lui-même (56).

Ils se posent des questions sur le fonctionnement du matériel mais aussi sur la manière d'exécuter certains gestes techniques. Ainsi, Agnès se demande, lors d'un prélèvement à la pipette, comment faire pour éviter que le niveau de liquide ne descende au moment où elle relève la pipette dans l'extrait 99. En fait, elle ajuste la solution au trait de jauge de la pipette en laissant la pointe de cette dernière dans la solution et puis relève la pipette. C'est normalement le contraire qu'il faut faire. Agnès fait appel à ses voisines pour régler le problème. Par la suite, elle effectue un second prélèvement à la pipette et y observe des bulles. Elle tente de tapoter sur la pipette pour les faire partir et puis fait

appel à l'encadrant pour qu'il vienne l'aider (107). L'encadrant étant occupé auprès d'autres étudiants, elle finit par résoudre son problème elle-même (113).
Léonard aussi a des difficultés à prélever à la pipette. Il ne sait pas comment effectuer le prélèvement tout en étant bien en face du trait de jauge. Il dit aller voir comment fait son voisin dans les extraits 144 à 146. Les référents utilisés dans le cadre de ce type de difficulté sont l'étudiant lui-même, l'encadrant, les pairs et le matériel.
Les deux types de problème présentés supra ne se rencontrent bien évidemment que dans l'analyse de l'activité des étudiants de première année.

Les étudiants doivent aussi parfois trouver des explications à un phénomène observé et trouver d'éventuelles solutions. Ainsi, Jacques et ses voisins vont tenter de trouver comment éviter de laisser la solution titrante à la lumière (164 et 165). En effet, le titrant utilisé réagit plus rapidement pour former un dépôt brunâtre sur les parois du récipient dans lequel il se trouve lorsqu'il y est exposé. Louis reprend d'ailleurs cette explication lorsqu'il montre qu'il s'est formé un dépôt brun dans le bécher lui servant de poubelle (467 et 469). Les étudiants se servent, comme référents, d'eux-mêmes, de l'encadrant et du matériel. Ce dernier est surtout employé lorsqu'il faut expliquer un phénomène physique comme le débordement de la burette ou l'éjection de la dernière goutte de solution de la pipette lorsque la poire à pipeter est mise dessus.

Les étudiants vont se servir des référents comme support à l'investigation lorsqu'ils doivent résoudre un problème, répondre à une question ou expliquer un phénomène.

3.7. La conformité

Une autre fonction pouvant être remplie par un référent est la fonction normative. Les étudiants ont le souci de la conformité.

Les étudiants veulent se conformer en tout point à ce qui est écrit ou dit. Dans ce cadre, les référents employés sont la procédure de laboratoire, les vidéos et l'étudiant lui-même. Les étudiants font appel à ces référents pour suivre les étapes, les faire dans l'ordre. Ils disent vouloir respecter la procédure à la lettre. C'est ce qui ressort des entretiens d'autoconfrontation avec Georges, Grace et Nerva. L'ordre des différentes étapes semble être d'une grande importance pour Georges dans les extraits 12, 116 et 244 et pour Nerva dans l'extrait 57. Grace, quant à elle, parle de relire le mode opératoire dans le but de le respecter dans les extraits 114, 126 et 151. Elle va jusqu'à recommencer une partie de la manipulation faite adéquatement parce qu'elle n'a pas suivi exactement ce qui était décrit dans la procédure. Elle craint d'avoir commis une erreur technique.

Un certain nombre d'étudiants ont également cette crainte. Ils utilisent différents référents pour éviter de se tromper : la procédure de laboratoire, les vidéos et toutes les ressources humaines présentes en laboratoire.

Catherine et Hadrien, respectivement dans les extraits 50 et 302, parlent de vouloir limiter les erreurs techniques voire les éviter. Anne (77), Antoinette (40) et Jacques (17) pensent tous les trois manipuler de manière inadéquate ou faire n'importe quoi. Agnès, Grace et Hadrien parlent d'erreurs techniques plus spécifiques. Agnès dit essayer d'éliminer des bulles qui se sont formées à la surface de la solution lors de la dilution dans les extraits 161 à 163, prendre une chaise pour éviter de commettre une erreur de parallaxe lors du remplissage de la burette dans l'extrait 349, etc. Grace explique, dans l'extrait 126, qu'il est décrit qu'il faut mettre un fond d'eau dans le ballon jaugé avant d'ajouter l'acide. Elle recommence une solution faite de manière adéquate pour respecter ce point. Hadrien se rappelle d'une erreur technique commise lors d'une séance de laboratoire antérieure qui avait entraîné une perte de points. Il avait mal homogénéisé une solution issue d'une dilution. Dans les extraits 199 et 203, il dit vouloir éviter que cela ne se reproduise.

L'une des erreurs que les étudiants ont apparemment assez peur de commettre est l'erreur technique. Cette crainte peut aller jusqu'à pousser certains étudiants à commettre une erreur comme Anne (143). Lors du remplissage du ballon jaugé, elle dépasse le trait de jauge. Elle retire alors le surplus à l'aide d'une pipette pasteur pour « *avoir le bon volume* ». Ce faisant, elle retire également une partie de la quantité de matière à diluer.

Un autre type d'erreur rejoignant un peu la précédente concerne l'utilisation du matériel. Agnès, lors du rinçage d'un bécher pour y transvaser la solution diluée, dit vouloir « *ne pas faire d'erreur euh dans l'utilisation du matériel* » (207).

Toujours concernant le matériel, il arrive que les étudiants cherchent ce qu'ils doivent utiliser à l'instar de Catherine et Anne. Catherine dit faire appel à ses voisins pour s'assurer qu'elle doit bien utiliser un bécher ou une pipette à tel moment de la manipulation dans les extraits 7 et 10. Anne n'est pas sûre d'elle. Dans les extraits 158, 160 et 163, elle dit s'assurer d'utiliser les bons « *récipients* » auprès de ses voisins ou en relisant la procédure de laboratoire. Ainsi, une autre erreur que les étudiants souhaitent ne pas commettre concerne le choix du matériel pour réaliser adéquatement la manipulation.

En plus du matériel, les étudiants font aussi très attention aux solutions qu'ils utilisent. Certains d'entre eux vont alors organiser les béchers ou erlenmeyers contenant les différentes solutions sur leur paillasse pour ne pas se tromper à la manière d'Agnès et Catherine. Dans les extraits 264, 306 et 392, Agnès dit organiser sa paillasse et revient plusieurs fois sur cette organisation pour éviter de confondre les solutions. Catherine

exprime elle aussi cette idée dans l'extrait 379. Elles ont, toutes les deux, peur de se tromper de solution. Ce souci semble justifié. En effet, Nerva, dans l'extrait 336, explique qu'il a failli se tromper lors du remplissage de la burette. Jacques, quant à lui, s'est trompé lors d'un titrage. Il a confondu deux béchers contenant des solutions différentes. Il l'avoue dans les extraits 218 et 222. Il doit alors tout jeter et recommencer. Grace a commis la même erreur. Elle dit, dans l'extrait 316, qu'elle lave et range tout pour éviter de refaire ce type d'erreur. Les cas présentés supra révèlent la crainte de faire réagir des substances de manière inadéquate.

Le dernier type d'erreur concerne les résultats. Agnès dit bien regarder la valeur du volume à l'équivalence obtenue pour son titrage, recompter les graduations sur la burette pour éviter de se tromper en prenant note de cette valeur dans les extraits 486 et 488. Anne explique, dans les extraits 274 et 276, qu'elle avait peur de laisser couler trop de titrant lors d'un dosage, d'aller trop vite, de louper le volume à l'équivalence. Hadrien explique, dans l'extrait 243, que, durant un titrage, il a toujours des doutes, qu'il veut faire quelque chose de correct pour éviter d'avoir une mauvaise cote. Enfin, Nerva dit faire appel à sa voisine dans l'extrait 243 pour s'assurer que la couleur de la solution est bien celle qu'il faut obtenir au terme du titrage. Ainsi, la dernière erreur que les étudiants craignent de commettre est d'avoir des valeurs inadéquates, notamment en deuxième année. Ceci est compréhensible quand on sait que ces étudiants sont cotés sur leur exactitude.

Les erreurs peuvent être corrigées ou évitées grâce à l'encadrant ou aux pairs. Agnès et Georges se servent de leur voisin dans les exemples suivants.

La voisine d'Agnès dépasse le trait de jauge du ballon jaugé lors de la dilution. Agnès, dans l'extrait 149, se dit qu'elle doit éviter de faire la même chose. Georges, quant à lui, parle de sa voisine dans l'extrait 67 en disant qu'il apprécie avoir quelqu'un en face de lui pour corriger ses éventuelles erreurs.

L'encadrant est utilisé dans ce cadre par Hadrien ou plutôt son voisin. En cours de manipulation, son voisin a des doutes sur la suite des opérations. Hadrien dit, lors de l'entretien, dans l'extrait 29, que, quand il a un doute, il préfère demander à l'encadrant pour éviter de faire des erreurs et de perdre du temps.

Dans le même ordre d'idée, les étudiants de deuxième année apprécient que les calculs effectués en cours de manipulation soient vérifiés. Pour cela, ils font appel à l'encadrant comme Nerva (281), à leurs pairs, s'en rendent compte ou prévoient de le voir en cours de manipulation comme Hadrien, Théodora et Titus.

Dans l'extrait 255, Hadrien explique que le premier titrage va lui permettre de vérifier ses valeurs. Il pourra mettre en doute les calculs effectués ou la préparation de la solution s'il n'obtient pas à peu près le volume qu'il a prévu d'obtenir.

Théodora dit se rendre compte avoir fait une erreur de calcul lors de la dilution en recalculant dans l'extrait 52. Titus a fait la même erreur que Théodora. Il s'en aperçoit en discutant avec sa voisine, ce qu'il explique dans les extraits 303 à 309 et 327.

Toujours concernant les erreurs commises, il arrive que les étudiants se rendent compte qu'ils en ont commises sur base de différents éléments.

Parmi ces éléments, les calculs effectués peuvent déjà être cités. Ces cas ont été présentés supra.

Le matériel ou un phénomène observé sont d'autres éléments pouvant aider les étudiants. Ainsi, Anne dit, dans les extraits 87, 89 et 91, se rendre compte qu'elle ne peut pas remplir le ballon jaugé à l'aide d'une pipette jaugée car il lui faudrait effectuer un certain nombre de prélèvements. Dans ce cas-ci, il faudrait remplir la pipette neuf fois. Antoinette s'aperçoit qu'il ne faut pas utiliser un bécher pour effectuer une dilution lorsqu'elle va chercher un morceau de parafilm permettant de fermer le récipient. Le morceau de parafilm est trop petit. C'est alors qu'elle se rappelle qu'une dilution s'effectue dans un ballon jaugé. Elle explique cela dans l'extrait 44.

Alors que Titus effectue un titrage, il s'aperçoit que la couleur de la solution n'est pas celle qu'il devrait avoir. Il explique avoir oublié l'indicateur dans les extraits 433 et 449. Il y a encore bien d'autres exemples illustrant l'aide que peut apporter le matériel et le déroulement de la manipulation. Il s'agit peut-être d'une coïncidence mais ils ont tous lieu lors de séances de laboratoire pour lesquelles les étudiants n'ont pas dû écrire la procédure de laboratoire c'est-à-dire lors des TP 5 en première année et TP acide ascorbique de deuxième année.

Les étudiants peuvent aussi prendre conscience d'avoir commis une erreur grâce aux pairs et à l'encadrant. Par exemple, l'encadrant intervient chez Antoinette lorsqu'elle oublie de faire partir la bulle d'air de la partie effilée de la burette (171) et lorsqu'elle laisse l'entonnoir sur la burette en cours de titrage (209). Ces deux erreurs peuvent toutes les deux impacter la valeur du volume obtenu à l'équivalence.

Il y a un autre exemple chez Louis. Il commet une erreur en début de manipulation : il fait la dilution dans un bécher. Dans les extraits 122 à 124, il explique que son voisin lui fait remarquer qu'il doit la faire dans un ballon jaugé. Louis recommence donc la dilution.

Les étudiants peuvent aussi se douter d'une erreur commise en comparant leurs résultats à ceux des autres. C'est ce que dit faire Louis dans les 452 et 454. Il a obtenu une valeur

nettement plus élevée que celle de ses camarades. Il remet toutes les étapes de rinçage en doute pour l'expliquer.

Lorsqu'ils se soucient de la conformité, les étudiants utilisent différents référents pour faire toutes les étapes de la manipulation dans l'ordre, éviter de commettre des erreurs qu'elles soient techniques, calculatoires ou autres et se rendre compte de ces erreurs pour les corriger.

3.8. L'économie gestuelle

Certains étudiants vont effectuer certains gestes par économie. Ils vont poser des actes ou éviter d'exécuter certaines actions par économie ou manque de temps. Ils savent qu'ils font une erreur. Ils ne se soucient pas de la conformité. Les référents utilisés par les étudiants sont le matériel, l'étudiant lui-même et l'encadrant. Ce dernier est surtout mentionné pour expliquer que ce qu'ils font n'est pas correct, qu'ils devraient normalement recommencer. Ils font alors référence à ce que leur dirait l'encadrant, selon eux.

C'est Louis qui mentionne l'encadrant dans l'extrait 480. Il n'obtient pas une valeur de volume proche de ce qui est attendu lors d'un titrage. Au lieu de recommencer, il décide de falsifier ses valeurs. Il profite du fait que l'encadrant ne soit pas là.

La personne utilisant le matériel comme référent est Grace dans les extraits 149 et 151. Elle cherche une solution pour ajuster au trait de jauge du ballon jaugé avec plus d'exactitude, pour éviter de dépasser le trait de jauge. L'encadrant lui propose d'utiliser la burette. Elle préfère employer une pipette pasteur. Elle explique qu'elle ne veut pas utiliser la burette parce qu'elle a « *un petit peu la flemme d'utiliser la burette* ». Grace ne souhaite pas utiliser cette pièce de verrerie car elle voit tout le travail, les gestes qu'il faut réaliser pour cela.

Il en est souvent de même pour les étudiants qui s'utilisent eux-mêmes comme référent. Ainsi en est-il de Grace, Louis et Hadrien. Grace, dans l'extrait 250, explique qu'elle essaye d'arriver au trait de jauge de la pipette jaugée, qu'elle a tenté plusieurs fois et que, pour finir, elle en a eu marre. Elle a donc fait son prélèvement de manière approximative. Dans l'extrait 108, Louis surenchérit lorsqu'il dit qu'il estime le volume des bulles présentes dans la pipette lors d'un prélèvement. Il trouve ce geste compliqué. Dans les extraits 130 à 134, il dit d'ailleurs qu'il ne veut pas recommencer le prélèvement. Il estime cela « *embêtant* » et dit que « *C'est pas grave* ». Hadrien reprend cette expression dans les extraits 160 à 162 en expliquant qu'il a oublié de rincer une pipette avant son conditionnement.

Dans cet ordre d'idée, des erreurs sont commises. Les étudiants en sont généralement conscients. Par exemple, Agnès et Louis ont tous les deux dépassé l'équivalence lors d'un titrage mais choisissent de garder la valeur du volume obtenue. Ils sont tous les deux conscients que cela aura un impact sur leurs résultats. Agnès, dans l'extrait 474, dit que ce n'est pas grave car cette erreur sera limitée par les résultats des autres titrages. Louis, quant à lui, dit qu'il prend note des valeurs même si elles sont inexactes dans les extraits 456 et 532 à 534.

Certains étudiants, dont Jacques et Louis, pensent à tort qu'il n'est pas utile de rincer les pièces de verrerie avant de les utiliser car d'autres étudiants l'ont fait au terme de leur propre séance de laboratoire. Ils ont donc du matériel censé être propre. Jacques laisse sous-entendre cette idée dans les extraits 194 et 196 et Louis dans les extraits 4, 270 et 280. Dans ce dernier extrait, il explique également que, si une pièce est sèche, elle est propre, il n'y a rien dedans.

Certains étudiants économisent leurs gestes parce qu'ils ne souhaitent pas en exécuter certains ou par manque de temps. Cela peut les amener à commettre des erreurs dont ils sont conscients mais dont ils ne se soucient que peu, notamment en première année. En effet, ils ne sont pas côtés sur l'exactitude, contrairement aux étudiants de deuxième année.

3.9. La balise

Les référents peuvent également servir de balise. Les étudiants font différents actes ayant un lien avec la tâche prescrite ou pas. Tous ces actes s'entremêlent, s'enchevêtrent dans l'activité. Il arrive parfois que l'étudiant ne sache plus ce qu'il doit faire. Il fait alors appel à l'un ou l'autre référent dans le but de se resituer dans la manipulation à effectuer.

L'un de ces référents est la procédure de laboratoire. Agnès (201), Catherine (41), Louis (291) et Hadrien (116) l'utilisent pour se remémorer ce qu'il faut faire, pour revenir dans la tâche.

L'encadrant est aussi un référent pouvant servir de balise. Jacques dit l'utiliser dans l'extrait 109 car il est un peu perdu. Il écoute donc les remarques faites.

Les pairs peuvent également jouer ce rôle. C'est Louis qui pose des questions à ses voisins et les observe pour savoir quoi faire (12 et 38).

Le dernier référent employé comme balise est l'étudiant lui-même. Il ne fait appel à rien ni à personne. Il tente de se rappeler où il en était comme Léonard et Hadrien. Ces deux étudiants ont été coupés dans leur action. Léonard a dû répondre à une question de son voisin (139). Hadrien discutait avec ses voisins et rigolait. Il a donc perdu le fil de la

manipulation et s'est demandé avec quel réactif il devait conditionner la pipette jaugée (145 à 153).

Il arrive que les étudiants ne se rappellent pas s'ils ont effectué un geste technique ou pas. Ils s'assurent de l'avoir fait en recommençant. Ainsi, Nerva va vider un ballon jaugé contenant un fond d'eau et qu'il a donc déjà rincé pour recommencer le rinçage. En fait, il ne sait pas ce qu'il y a dans le ballon (103). Théodora se demande si elle a rincé la burette. Dans l'extrait 38, elle exprime qu'elle préfère la rerincer par acquis de conscience.

3.10. L'apprentissage

Lors de ce type d'activité, les étudiants sont en interaction les uns avec les autres et avec l'encadrant. Certains disent apprendre lorsqu'ils posent des questions ou reçoivent des explications. Les référents ont donc également une fonction d'apprentissage ou, du moins, de support.

Le référent employé peut être l'encadrant comme pour Antoinette. Lors de l'activité, l'encadrant intervient pour lui faire remarquer qu'elle a oublié de faire partir la bulle d'air de la partie effilée de la burette. Dans les extraits 173 et 180, non seulement elle dit avoir appris mais elle souligne qu'elle aura plus tendance à y penser maintenant que l'encadrant est intervenu.

Le référent peut également être les pairs. C'est le cas pour Agnès qui, dans les extraits 36 et 99, explique qu'elle apprend en observant ses voisines et en leur posant des questions.

Le matériel peut aussi servir de référent. Dans ce cas, l'apprentissage en concerne le fonctionnement. Dans l'extrait 388, Louis explique qu'il a appris comment fonctionne le robinet de la burette en le manipulant.

Quel que soit le référent utilisé, les apprentissages réalisés sont essentiellement d'ordre techniques.

3.11. L'appel à l'encadrant ou aux pairs évité

Quelques référents permettent d'éviter certaines interactions. Ils sont utilisés pour éviter de faire appel à l'encadrant ou aux pairs pour diverses raisons comme la crainte de gêner d'autres personnes ou l'intervention de ces personnes auprès d'autres étudiants. Les référents sont l'encadrant, les pairs et l'étudiant lui-même. L'étudiant, lorsqu'il veut éviter de gêner l'encadrant, fait appel aux pairs ou à lui-même. C'est ce que laisse entendre Agnès dans l'extrait 337 dans lequel elle explique qu'elle se pose d'abord

la question à elle-même pour éviter, éventuellement, de la poser. Sa crainte de gêner l'encadrant transparaît surtout dans l'extrait 79. Elle y explique que ses voisines et elle s'entraident pour éviter « *d'appeler le prof toutes les cinq minutes* ». Cette idée de vouloir éviter d'appeler l'encadrant apparaît aussi dans l'extrait 203 « *C'était la première fois que j'appelais le prof. C'était raisonnable* ».

Elle veut éviter de gêner l'encadrant mais aussi ses pairs. Dans ce cas, elle fait appel à l'encadrant. Elle se justifie dans l'extrait 107 « … *les autres étaient fort concentrées sur ce qu'elles faisaient. J'allais pas les déranger. J'aime pas quand on me dérange quand je suis fort concentrée et euh surtout sur ça. Là-dessus, je me dis « Je vais demander au prof qu'il vienne m'aider parce que ce n'est pas facile ».* »

Cette idée d'éviter de gêner les autres apparaît également en deuxième année. Hadrien dit, dans l'extrait 207, qu'il remet le bouchon sur la pissette d'eau pour que ses voisins n'aient pas à le faire. Titus explique, dans l'extrait 202, que les bouteilles de réactifs sont communes avec sa voisine. Pour éviter de se gêner mutuellement, il transvase un peu de certaines de ces solutions dans des béchers.

L'idée principale pour éviter de faire appel à l'encadrant ou aux pairs est la gêne que cela pourrait engendrer pour la ou les personnes interpellées.

3.12. L'obtention d'informations par d'autres canaux

Certains étudiants peuvent adopter des stratégies dans le but d'éviter de poser des questions. Ils vont alors tenter d'avoir un maximum d'informations par d'autres canaux. Agnès et Catherine écoutent leurs voisins qui ont une discussion portant sur la manipulation. Les référents sont donc les pairs. Dans les extraits 286 et 308, Agnès explique que ses voisines sont plus avancées qu'elle et qu'elle écoute ce que ces dernières disent pour ne pas devoir poser des questions par la suite. Catherine, quant à elle, parle d'obtenir des informations importantes pour la suite de sa manipulation dans les extraits 161 et 168.

Agnès et Georges vont avoir l'encadrant comme référent. Ils écoutent ce que dit l'encadrant lors d'une discussion de ce dernier avec d'autres étudiants. Ils ne participent pas eux-mêmes à la conversation. Dans l'extrait 208, Agnès explique simplement qu'elle écoute la conversation car ses voisines sont plus avancées qu'elle. Georges, quant à lui, était occupé d'expliquer quelque chose à sa voisine quand l'encadrant est intervenu. Dans l'extrait 258, il dit qu'il écoute les remarques faites à sa voisine.

3.13. Le respect des normes de laboratoire

Lors des entretiens, les étudiants parlent aussi de dangerosité et de sécurité en laboratoire. Ils font alors souvent appel à des normes de laboratoire. Le référent employé est principalement l'étudiant lui-même. Un seul d'entre eux mentionne les règles de sécurité en laboratoire. Il s'agit de Georges lorsqu'il décide de retirer ses bracelets dont il a été fait mention dans le paragraphe 2.

Les étudiants parlent de prendre des précautions face aux dangers chimiques que peuvent présenter les substances mises à disposition. Ils donnent des propriétés à ces substances que ces dernières ne possèdent pas. Par exemple, Agnès explique qu'elle range et essuie sa paillasse pour éviter qu'il n'y ait des trous dans les feuilles de sa voisine causés par l'acide ou la base dans l'extrait 250. L'acide en question est du vinaigre et la base, de la soude très peu concentrée. Vu la faiblesse des concentrations des solutions employées, il n'y a pas de risque de trous dans les feuilles. Un peu plus tard, lors du conditionnement de la burette avec la base, elle a peur pour la peau de son pouce car elle est entrée en contact avec la solution (329). Georges (330) et Louis (129) expliquent qu'ils ne peuvent pas jeter certaines substances dans l'évier parce qu'elles sont dangereuses. Il n'y a pas de réflexion sur la réelle dangerosité des substances en première année sauf parfois durant l'entretien. Grace a recommencé la dilution du vinaigre car les vidéos et son protocole mentionnent qu'il faut d'abord ajouter un fond d'eau dans le ballon jaugé avant d'ajouter l'acide lorsque ce dernier est concentré. Elle avait ajouté l'acide avant l'eau. Lors de l'entretien (126), elle explique qu'elle n'était pas obligée de recommencer car l'acide à diluer était du vinaigre.

Les étudiants de deuxième année donnent plus de détails sur la raison, adéquate ou non, pour laquelle la ou les substances sont dangereuses. Lorsqu'un de ses voisins fait déborder la tourie de récupération, Hadrien se retourne. Lors de l'entretien (111 et 125), il dit que la tourie est remplie de déchets et qu'il y a des produits dangereux. Une partie de cette dangerosité est due au fait que les étudiants ne savent pas exactement ce qu'il y a dedans. Titus, lorsqu'il effectue une dilution, explique qu'il faut normalement ajouter l'eau et puis l'acide pour éviter des projections mais que, dans ce cas-ci, l'acide est faible et donc moins corrosif (133). Son raisonnement est inadéquat. Ce n'est pas parce qu'un acide est faible qu'il est moins corrosif. En réalité, la dangerosité d'un acide provient surtout de sa concentration en solution et de sa nature, de ses propriétés.

En plus des dangers chimiques, les étudiants craignent également de casser de la verrerie de laboratoire. Agnès et Grace expriment toutes les deux avoir peur de casser

la burette dans les extraits 325 et 178 respectivement. Les étudiants de deuxième année ne mentionnent aucune crainte de casser la verrerie.

3.14. Le gaspillage évité

Une autre fonction mentionnée par les étudiants lors des entretiens concerne l'utilisation de certaines substances. Ils tentent, dans la mesure du possible, d'éviter le gaspillage. Pour cela, ils mettent en commun des solutions. Cette fonction n'est clairement exprimée que par Hadrien dans l'extrait 226. Il dit proposer un reste de solution à ses voisins au cas où ils en auraient eux aussi besoin.

La mise en commun des solutions s'observe aussi lors des activités expérimentales réalisées par les étudiants de première année. Dans le cas de ces étudiants, c'est plutôt pour éviter de manquer de verrerie. Ils ont en effet tendance à utiliser un grand nombre de béchers et erlenmeyers puisqu'ils transvasent toutes les solutions dans ce type de pièce même lorsque ce n'est pas utile.

3.15. La mise en suspens de la tâche

La dernière fonction des actes exécutés par les étudiants est la mise en suspens de la tâche à réaliser. Les étudiants sont conscients de moments durant lesquels ils ne sont plus à la tâche. Le seul référent utilisé est bien entendu eux-mêmes. Ce sont eux qui décident de poursuivre ou non la tâche.

La description des actes réalisés par les étudiants lors de l'activité expérimentale montre que les étudiants discutent beaucoup, parfois sur des sujets sans lien avec la tâche à réaliser. Seuls Agnès, Grace, Hadrien, Nerva et Titus le mentionnent lors des entretiens. Les trois derniers étudiants sont en deuxième année. La plupart du temps, ils disent discuter lorsqu'ils effectuent des gestes automatiques, des gestes sur lesquels ils n'ont pas besoin d'être attentifs. Hadrien parle de blague entre étudiants dans l'extrait 156, de défi qu'ils se lancent dans l'extrait 188, d'une discussion dans l'extrait 172. Nerva explique, dans les extraits 112 et 116, qu'il regarde ce qu'il se passe autour de lui et discute quand il n'a pas besoin d'être attentif. Titus dit discuter lorsqu'il effectue des gestes répétitifs ou dont il a l'habitude dans les extraits 294 et 296. Les étudiants de deuxième année discutent, rigolent, … surtout lorsqu'ils effectuent des gestes qu'ils font un peu par automatisme. Il arrive d'ailleurs qu'ils fassent des erreurs du fait de leur inattention. Ainsi en est-il d'Hadrien qui oublie de laver une pipette jaugée avant de la conditionner dans l'extrait 160 ou de Titus qui laisse déborder la burette en la remplissant dans l'extrait 418.

En première année, Agnès et Grace sont les seules à avoir mentionné qu'en labo, ils discutent. Agnès dit parler avec les collègues qu'elle croise lorsqu'elle se déplace dans les extraits 171 et 434. Elle dit aussi écouter les conversations de ses voisines dans l'extrait 199. Grace, quant à elle, dit discuter avec son voisin alors qu'elle effectue des rinçages dans l'extrait 218. Elle y explique qu'elle ne sait pas trop ce qu'elle fait.

Il arrive effectivement que les étudiants fassent certains gestes pour s'occuper, pour rester en mouvement. Ils disent ne pas savoir ce qu'ils font, chipoter. Par exemple, Anne, dans l'extrait 24, explique qu'elle chipote car elle ne sait plus comment faire une dilution. Dans l'extrait 194, Jacques parle de nettoyer la burette pour s'occuper les mains. Hadrien dit qu'il bouge, se déplace, regarde autour de lui, fait autre chose, … dans l'extrait 286.

Parfois, il y a aussi des moments d'absence, des pauses, des périodes pour reprendre son souffle comme mentionné par Hadrien et Théodora dans les extraits 289 et 61, respectivement. Les étudiants ressentent le besoin de ne pas toujours être dans la réalisation de la tâche, de discuter, de bouger, de reprendre leur souffle, …

3.16. Résumé des fonctions

Le tableau 49 (page ci-après) reprend les différentes fonctions remplies par les actes mentionnées lors des entretiens d'autoconfrontation ainsi que leur définition.

Lors des entretiens, certaines fonctions sont très présentes à l'image des agir étayé et non étayé, de la régulation, de la planification, du soucis de conformité, ... D'autres sont plus anecdotiques, moins évoquées par les étudiants comme l'économie de gestes, la balise, l'appel aux pairs ou à l'encadrant évité, l'obtention d'informations par d'autres canaux ou encore le gaspillage évité. Il est cependant à noter que, l'entretien n'ayant pas couvert toute l'activité de laboratoire et donc tous les actes réalisés, il est possible que certains gestes effectués par les étudiants aient ces fonctions plus anecdotiques sans que cela n'ait été mentionné. De plus, malgré les précautions prises (entretiens menés par des personnes ne travaillant pas dans le domaine de la chimie, mention du cadre de recherche, …), il est possible que les étudiants « censurent » une partie de leur activité de pensée, qu'ils n'osent pas partager certains éléments de peur du « qu'en dira-t-on ». En outre, les actes sont fonctions de l'environnement, de la situation rencontrée par les étudiants. Il est donc également possible qu'ils n'aient pas eu l'occasion d'effectuer un acte particulier revêtant l'une ou l'autre des fonctions.
Ce sont les raisons pour lesquelles, dans la suite de cet écrit, toutes les fonctions sont reprises, même les plus anecdotiques.

Fonctions	***Définition***
Agir non étayé	Geste que l'étudiant exécute sans réflexion, sans justification
Agir étayé	Geste que l'étudiant peut justifier, auquel il donne un but scientifique, utilitaire, …
Régulation	Acte posé pour se rassurer, vérifier que le geste réalisé ou à réaliser est adéquat
Planification	Acte posé dans un but logistique, organisationnel
Curseur temporel	Acte permettant à l'étudiant de se situer dans le temps de la manipulation
Support à l'investigation	Acte exécuté pour résoudre un problème ou expliquer une observation
Respect de la conformité	Acte posé dans un but normatif, dans un soucis d'exactitude
Economie de gestes	Acte fait pour éviter d'exécuter certaines actions ou acte non effectué
Balise	Acte posé pour se resituer dans la manipulation
Apprentissage	Questions posées ou observation des pairs dans le but d'apprendre
Appel à l'encadrant ou aux pairs évité	Acte permettant d'éviter de gêner soit l'encadrant soit les pairs quand ils sont apparemment occupés
Obtention d'informations par d'autres canaux	Stratégie adoptée pour éviter de poser des questions
Respect des règles de sécurité	Acte posé pour respecter des normes de laboratoire, éviter de casser des pièces de verrerie ou méfiance vis-à-vis des substances employées
Gaspillage évité	Mise en commun de solutions pour éviter de les jeter
Mise en suspens de la tâche	Arrêt momentané de la tâche

Tableau 49 : Définition des différentes fonctions associées aux actes des étudiants

Toutes ces fonctions présentées l'ont été sans tenir compte des catégories de gestes associées. Or, cette partie de recherche portant sur l'activité part d'un constat et d'une interrogation. Le constat est le suivant : quelle que soit l'avancée dans le cursus, les étudiants exécutent des gestes « parasites ». Ces derniers doivent donc avoir des fonctions aux yeux des étudiants.
L'interrogation porte sur les connaissances que les étudiants ont sur les gestes techniques. Quel(s) sens donnent-ils à ces gestes ? En connaissent-ils les buts scientifiques ? La réponse à cette dernière question est partiellement connue, certains des gestes remplissant la fonction d'agir étayé et d'autres d'agir non étayé.
La suite de cet écrit s'attache à faire le lien entre les catégories de gestes, les référents employés et les fonctions évoquées par les étudiants.

4. Fonctions des actes posés par les étudiants

4.1. Fonctions remplies par les référents

Lors des entretiens, la grande majorité des actes sur lesquels se sont exprimés les étudiants ont été mis en lien avec les ressources employées. Comme mentionné dans le chapitre traitant des questions de recherche, ces référents remplissent les fonctions citées et donnent ainsi du sens aux actes réalisés en laboratoire.
La figure 148 (page 354) met en relation les référents et les fonctions qu'ils remplissent. Chaque barre verticale représente une ou des fonction(s) remplies par les référents repris sur la gauche du graphe.

Tous les référents sont employés dans le cadre d'un agir non étayé et du soucis de conformité. Les étudiants vont utiliser tout ce qui est à leur disposition pour effectuer la tâche de la manière la plus adéquate possible. Par contre, ces référents ne vont pas tous donner une justification aux gestes. C'est le cas des vidéos. En effet, elles montrent surtout comment réaliser les techniques de laboratoire mais ne mentionnent que très peu voire même pas du tout le pourquoi des gestes. Il n'est donc pas étonnant qu'elles ne remplissent que des fonctions en lien direct avec la manière de faire et pas le motif.
Les autres référents sont utilisés, à un moment ou l'autre, pour justifier, expliquer un geste qu'il soit technique, parasite, interactionnel ou qu'il s'agisse d'une période de lecture du protocole.

Il est également remarquable que les ressources humaines sont les référents remplissant le plus de fonctions. Il apparaît donc que les interactions soient d'une importance non négligeable, nonobstant les résultats obtenus lors de l'étude de la fréquence d'évocation des référents « encadrant » et « pairs » lors des entretiens au

paragraphe 2.2. Les étudiants ressentent souvent le besoin de faire appel à ces référents pour se rassurer, obtenir des informations, … et apprendre. Cette dernière observation était attendue car conforme à l'hypothèse socioconstructiviste mettant l'accent sur l'utilité des interactions lors de la mise en place des savoirs et savoir-faire.

Un grand nombre de fonctions ne sont remplies qu'en lien avec des ressources humaines : l'appel aux pairs et à l'encadrant évité, l'obtention d'informations par d'autres canaux, la possibilité de se situer dans le temps de la manipulation (curseur temporel), le respect des règles de sécurité, le gaspillage évité et la mise en suspens de la tâche.

Cette figure 148 donne bien évidemment plus d'informations que ce qui est expliqué supra On peut par exemple relever que le matériel est un facteur de l'apprentissage technique ou que la procédure de laboratoire n'est pas le seul moyen, pour l'étudiant, de planifier son agir. Cependant, l'objectif de ce chapitre n'est pas que de mettre en relation les référents employés et les fonctions mais également de faire le lien avec les différentes catégories de gestes.

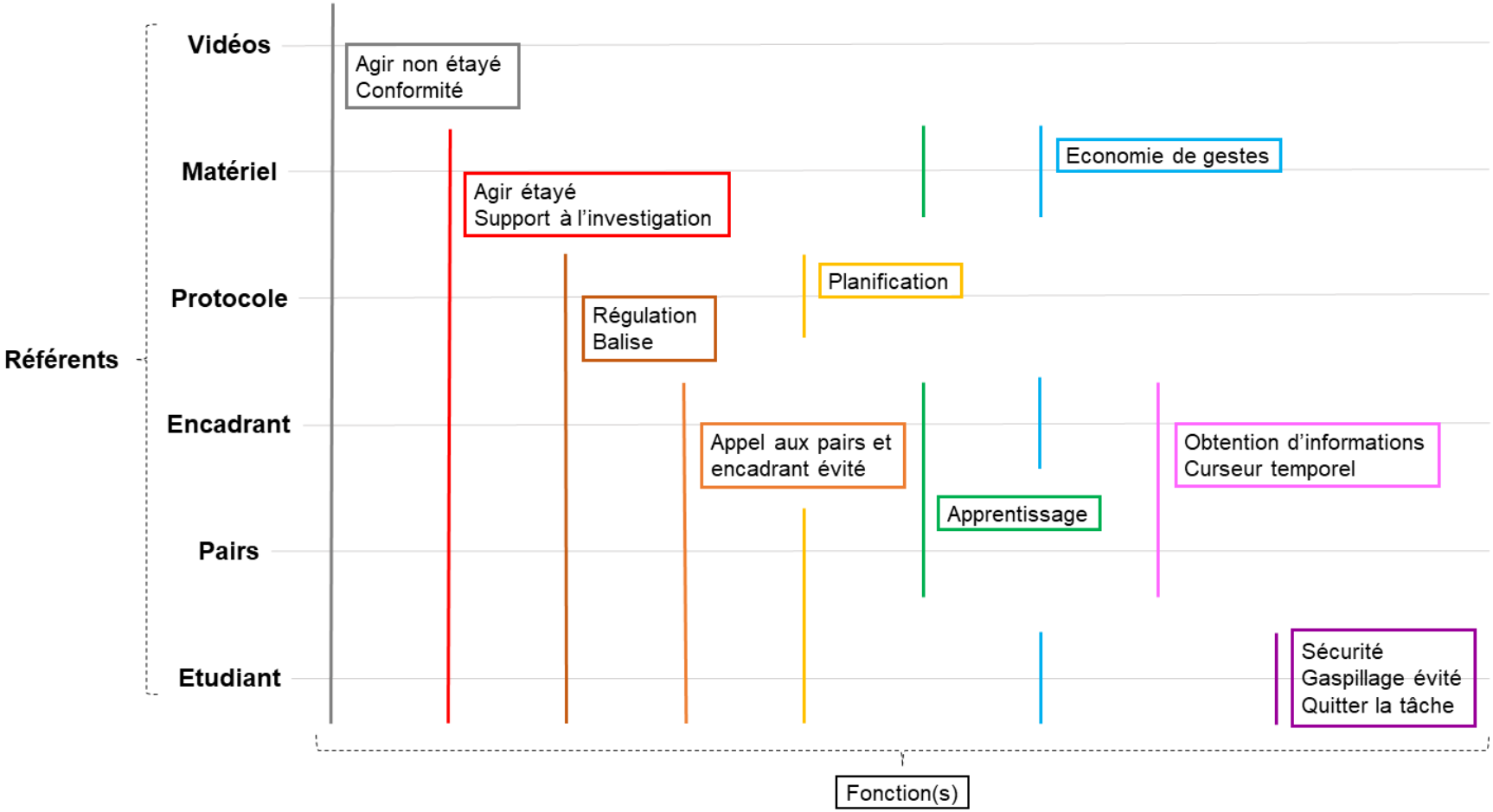


Figure 148 : Fonctions remplies par les différents référents

4.2. Fonctions des différentes catégories de gestes

Connaissant les fonctions remplies par les actes, il est possible de les relier aux gestes auxquelles elles font référence et donc, aux catégories de gestes. La figure 149 met en relation les fonctions remplies et les catégories de gestes dans lesquelles elles interviennent.

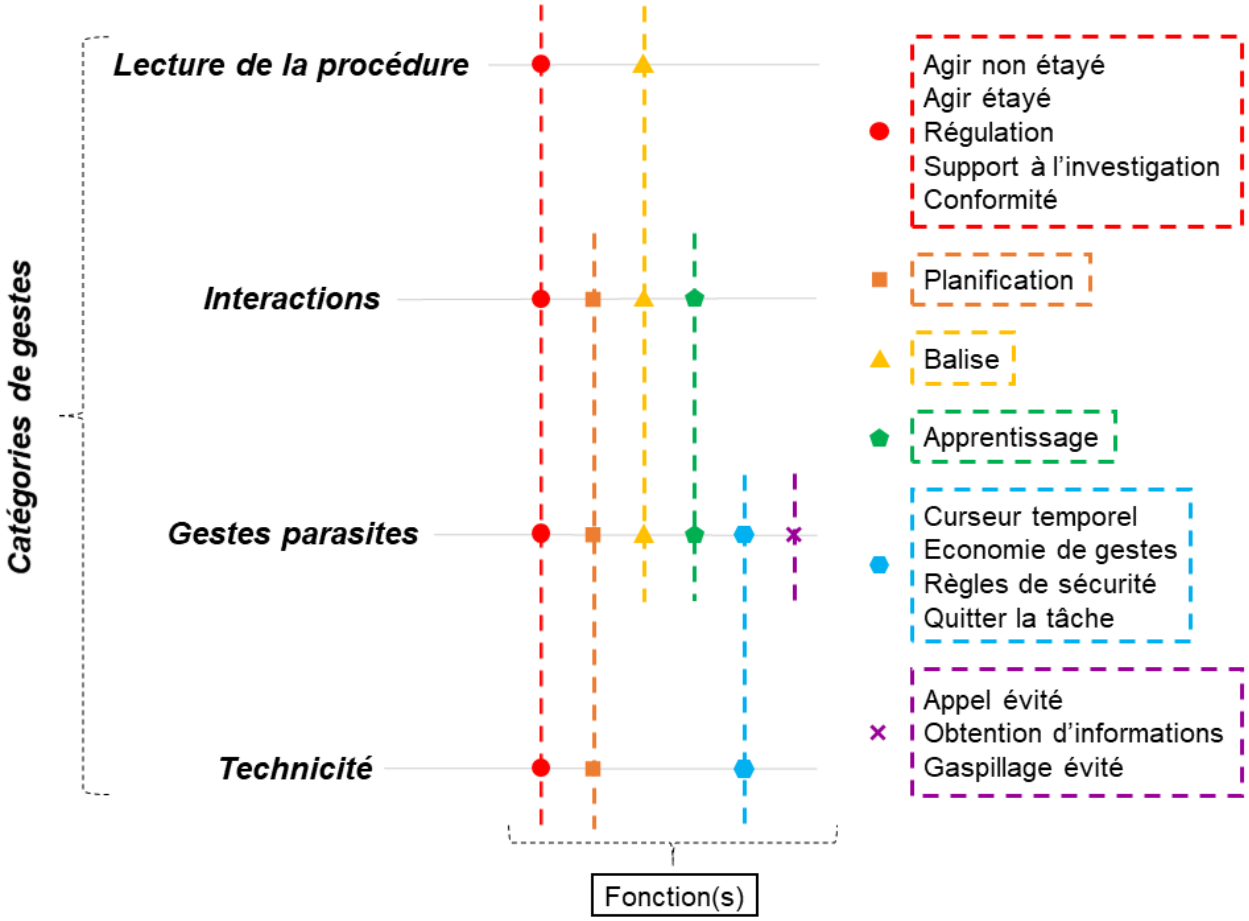


Figure 149 : Fonctions remplies lors d'actes des différentes catégories de gestes

Une analyse détaillée de la figure 149 ne va pas être réalisée dans le cadre de ce travail. Seules des observations générales sont faites et quelques particularités soulignées.

Certaines fonctions sont remplies lors d'actes quelle que soit la catégorie de gestes. Généralement, ce sont les fonctions mises en relation avec le plus de référents. Cette figure confirme que ce sont également les fonctions les plus présentes lors de l'activité expérimentale des étudiants.

Dans l'autre sens, une des catégories de gestes comporte toutes les fonctions : les gestes parasites. Une raison à cela : il y a, en réalité, différents types de gestes parasites :

- des gestes techniques non présents dans la tâche prescrite ;
- des gestes organisationnels ;
- des temps d'observation ;
- des moments d'attente ;
- des périodes de discussion.

Etant donné la diversité de ces gestes, n'importe quel référent peut être à l'origine d'un geste qualifié de « parasite ».

Plus particulièrement, certains éléments peuvent paraître anormaux lorsque les figures 148 et 149 sont comparées.

La première anomalie concerne les périodes de lecture du protocole. Lors des entretiens, les étudiants disent utiliser la procédure pour planifier leurs actes. Pourtant, ils n'expriment pas le faire lorsqu'ils lisent le protocole. En fait, les étudiants disent penser à la procédure, au « mode opératoire » au cours d'autres actes et planifier à ce moment-là. Les périodes de lecture du protocole servent essentiellement à agir en direct, à s'informer de ce qu'il faut faire sur le moment même et pas à planifier ses idées.

Une deuxième observation paraît singulière : les étudiants ne disent pas apprendre lorsqu'ils exécutent les gestes et ce, malgré que l'une des ressources employées lors de l'activité soit le matériel. Les étudiants disent apprendre en faisant référence au matériel lorsqu'ils en comprennent le fonctionnement en cours d'utilisation. Ils ne disent pas apprendre les gestes techniques en les exécutant. Il est vrai que, comme l'écrivait Séré (2002), « *learning by doing is seldom effective* ». Les étudiants nous en donnent, en quelque sorte, confirmation.

Par contre, ils disent apprendre lors de l'exécution de gestes parasites. Souvent, cet apprentissage s'effectue à l'occasion d'une erreur commise. Ils apprennent de leurs erreurs.

Dans la suite de ce travail, nous nous concentrons sur les fonctions remplies par les gestes parasites et les gestes techniques.

4.2.1. Fonctions remplies par les gestes techniques

Les gestes techniques recouvrent tous les gestes reconnus, la tâche prescrite.

4.2.1.1. *En première année (TP 4 & 5)*

Lors des entretiens, les étudiants donnent des justifications à certains des gestes qu'ils réalisent. Leur agir est étayé. Ces justifications sont souvent adéquates mais peuvent parfois ne pas l'être. Ainsi, Agnès dit essuyer un bécher parce qu'il est sale alors que la justification à donner aurait dû être d'éviter de diluer la solution qu'elle allait y verser.

Les étudiants justifient certains de leurs gestes mais pas tous. En effet, beaucoup de gestes techniques ne sont que décrits par les étudiants. Ils dépeignent ce qu'ils sont occupés de faire sans donner d'explications complémentaires. Ainsi, leur agir n'est pas toujours étayé. Il arrive d'ailleurs qu'ils se posent des questions sur la conduite à tenir, sur les instruments à utiliser, sur les solutions durant leur action. Les étudiants disent aussi faire ce qui est écrit dans leur protocole, ce qu'un de leurs pairs ou l'encadrant leur a dit de faire ou ce qu'ils ont vu. Il apparaît également qu'ils soient, dans certains cas, à la poursuite d'un objectif. Par exemple, Agnès et Georges disent, lors du rinçage de la pipette et/ou de la burette qu'il faut qu'il y ait du liquide sur toute la surface. C'est leur objectif mais aucune information n'est donnée sur la raison le sous-tendant.

Dans certains cas, l'objectif qu'ils fixent à un geste technique est lié à un souci de conformité. Ainsi, Agnès dit faire attention à ne pas dépasser le trait de jauge du ballon jaugé. Elle dit également qu'elle doit ajuster le niveau de solution pile à la graduation zéro de la burette lors de son remplissage. Elle ajoute qu'elle n'a pas d'excuse puisqu'elle a pu avoir une chaise pour éviter l'erreur de parallaxe. Parfois, la question de la conformité se pose lorsque les étudiants prennent conscience qu'ils ont commis une erreur. Grace, suite à une erreur commise lors du premier titrage, décide de tout rincer et de tout ranger pour éviter de se retromper. Pour rappel, elle a confondu le bécher de solution à titrer avec le bécher « poubelle ». En cours de titrage, Louis se rend compte qu'il ajoute trop de titrant. Normalement, il aurait déjà dû atteindre l'équivalence. Il va donc chercher les erreurs qu'il a pu commettre.

En plus de la conformité, les entretiens des étudiants révèlent que les gestes techniques sont entrecoupés de moments de régulation, conformément à ce que mentionne Vermeersch (1985) dans son article. Les étudiants s'assurent de ce qu'ils font en consultant leur protocole de laboratoire, leurs pairs, l'encadrant, … même au milieu

d'une action. Il arrive aussi que les étudiants s'assurent des valeurs à obtenir auprès de leurs pairs.

Les étudiants consultent également leur procédure de laboratoire pour planifier leurs actes. Cette planification s'effectue aussi en cours d'action. Certains étudiants réfléchissent aux actes à effectuer par la suite durant leur action. C'est ce qu'exprime Agnès alors qu'elle prépare le remplissage de la burette. Les étudiants expliquent aussi que certains actes ont pour but de gagner du temps. Ainsi en est-il du titrage rapide qui permet de ne pas effectuer tout le titrage au goutte à goutte. C'est aussi pour gagner du temps qu'ils ont un bécher « poubelle ». Cela leur permet de ne pas devoir se rendre près de la tourie de récupération à chaque fois qu'ils ont une solution à jeter.

Lié à la planification, il arrive que certains étudiants se trompent et doivent recommencer tout ou partie de la manipulation. En recommençant, ils se disent qu'ils ont perdu du temps et qu'ils doivent accélérer. C'est ce qu'exprime Catherine lorsqu'elle doit recommencer la dilution. Elle est son propre curseur temporel.

Dans l'idée de ne pas perdre de temps, il arrive que certains gestes ne soient pas effectués ou qu'ils soient réalisés de manière inadéquate par économie. Ainsi en est-il de Louis qui ne veut pas recommencer un prélèvement malgré les bulles présentes dans la pipette ou de Grace qui prend note de la valeur du volume d'un titrage alors qu'elle sait que l'équivalence a été dépassée. Elle justifie par le fait qu'une moyenne de mesures va être faite et que ce n'est donc pas grave.

Lors de l'activité, les étudiants peuvent rencontrer des problèmes. S'ensuit alors un moment de réflexion, d'investigation. Dans le cadre de gestes techniques, il s'agit généralement de comprendre le fonctionnement du matériel mis à disposition. Catherine et Léonard vont ainsi se demander comment fonctionne la pompe à crémaillère. Agnès se demande pourquoi le niveau du liquide redescend dans la pipette lorsqu'elle la soulève.

Lors du premier TP, les étudiants se soucient de la sécurité pendant qu'ils manipulent. Ils parlent de produits dangereux à l'image d'Agnès lorsqu'elle conditionne la burette avec la solution de soude caustique. Ils expriment aussi leur crainte de casser une pièce de verrerie comme Agnès et Grace.

Les gestes techniques remplissent donc différentes fonctions aux yeux des étudiants de première année :

- agir étayé ;
- agir non étayé ;
- conformité ;
- régulation ;
- planification ;

- investigation ;
- économie de gestes ;
- curseur temporel ;
- sécurité.

4.2.1.2. *En deuxième année (TP acide ascorbique)*

En deuxième année, les fonctions remplies par les gestes techniques ne sont pas fort différentes. Toutes les fonctions citées précédemment par les étudiants de première année le sont aussi par ceux de deuxième si ce n'est la sécurité. En plus de ces fonctions, certains étudiants de deuxième année vont expliquer qu'il leur arrive de quitter la tâche alors qu'ils ont une action en cours. Il y a, même dans le courant d'une action, une mise en suspens de la tâche. La suite de cet écrit s'attache à montrer les différences entre les deux groupes.

La première différence concerne les gestes techniques que les étudiants font sans donner de justification, l'agir non étayé. Alors que les étudiants de première année se posent un grand nombre de questions sur ce qu'il faut utiliser et comment l'utiliser, il n'en est rien en deuxième. Cette observation est attendue. Les étudiants de deuxième ont déjà fait un certain nombre de dilutions et de titrages. Ils ne se posent plus ce type de question. Ils parlent d'ailleurs de mouvements automatiques, habituels, faciles.

Sur la fonction de conformité aussi il y a une petite différence entre les deux groupes d'étudiants. En deuxième année, les étudiants sont cotés sur l'exactitude de leurs mesures. Cela apparaît dans les entretiens. Certains parlent de perte de points s'ils se trompent. Ils vont jusqu'à vérifier plusieurs fois si la couleur de leur solution correspond bien à celle qu'ils sont censés obtenir quitte à demander confirmation à leurs pairs. Ainsi, Nerva va demander à sa voisine si la couleur de la solution obtenue est bien celle qu'il doit avoir à l'équivalence.

La fonction de régulation apparaît également en deuxième mais ils sont plus centrés sur les résultats à obtenir plutôt que sur les gestes techniques à effectuer. Ils parlent de s'assurer d'obtenir la bonne couleur de la solution à l'équivalence du titrage par exemple. Pour rappel, les étudiants de deuxième année font aussi appel à moins de référents que ceux de première. Etant plus expérimentés, ils font moins appel à l'encadrant ou au protocole de laboratoire. Les gestes s'en retrouvent moins entrecoupés de périodes de prise d'informations.

Il y a investigation lorsque les étudiants se retrouvent confrontés à un phénomène dont ils n'ont pas l'habitude. La manipulation impliquait une réaction plus lente qu'à l'habitude. Il était donc nécessaire d'attendre deux à trois secondes entre chaque ajout

de titrant pour laisser le temps à la réaction de se faire. Certains étudiants se sont posés des questions pendant le titrage parce qu'ils n'atteignaient pas l'équivalence au volume prévu ou parce que la couleur de la solution n'était pas celle à laquelle ils s'attendaient.

En deuxième année, il y a moins de cas où les étudiants font l'économie de gestes parce qu'ils ne veulent pas recommencer. Il est probable que ce soit en partie dû à l'évaluation. Les étudiants ne peuvent pas faire l'économie de gestes qui pourraient avoir un impact direct sur l'exactitude de leurs résultats au risque de perdre des points.

La dernière différence concerne la nouvelle fonction remplie par les gestes techniques : la mise en suspens de la tâche. Les entretiens des étudiants de deuxième année laissent apparaître qu'ils discutent beaucoup, surtout lorsque les gestes qu'ils effectuent ne demandent pas une grande attention ou que ces gestes sont devenus des automatismes. Ils ne pensent plus du tout à ce qu'ils sont occupés de faire, ce qui les amène parfois à commettre des erreurs comme Hadrien et Titus. Hadrien oublie de rincer une pipette jaugée et Titus fait déborder la burette en la remplissant.

4.2.2. Fonctions remplies par les gestes parasites

Les gestes parasites ne sont pas tous de même nature. Certains de ces gestes sont des moments d'arrêt, d'attente, d'observation, … tandis que d'autres sont des périodes durant lesquelles les étudiants sont en mouvement, durant lesquelles ils agissent. Ces gestes parasites sont présents quelle que soit l'expertise de l'étudiant. Si on estime que les étudiants de deuxième année possèdent une plus grande expertise en la matière, la raison de la présence de ce type de gestes peut poser question.

4.2.2.1. *En première année (TP 4 & 5)*

Comme mentionné précédemment, il y a différents types de gestes parasites. Tout d'abord, il y a les erreurs techniques commises et les gestes n'apparaissant pas dans la procédure telle que reconnue par les experts de la discipline c'est-à-dire la tâche prescrite. Comme attendu, beaucoup de ces actes sont des agir non étayés. Un grand nombre d'entre eux ne sont pas expliqués par les étudiants. Lors de l'entretien, ils ne font que décrire ce qu'ils font sans donner d'informations complémentaires si ce n'est parfois qu'ils ne connaissent pas la raison de leur acte à l'image de Grace qui parle de rincer sans savoir ce qu'elle fait ou de Anne qui explique qu'elle fait trop de rinçages. Les étudiants font aussi ce qui leur est dit ou ce qu'ils ont vu comme Louis lorsqu'il explique qu'il a fait la dilution dans un bécher parce que Jacques le faisait. Il arrive aussi que ces gestes poursuivent un but. Ainsi en est-il d'Agnès qui essuie un bécher parce qu'elle trouve qu'il est sale.

Certains gestes parasites remplissent aussi la fonction d'agir étayé. Les étudiants parviennent à justifier certains de leurs gestes semblant inutiles aux yeux d'un expert. Par exemple, certains étudiants disent tapoter la pipette ou la burette pour faire partir un maximum d'eau, essuyer l'erlenmeyer destiné au titrage pour éliminer les impuretés ou éviter de diluer la solution à titrer, …

Une autre fonction remplie par les gestes parasites impliquant une action est la conformité. Ils tentent de respecter une consigne donnée ou ce qu'ils pensent figurer dans la procédure. Certains prennent note de la valeur du volume obtenu lors du titrage rapide parce qu'il faut, d'après eux, prendre note de chaque mesure effectuée. Grace recommence la dilution alors que celle qu'elle a exécutée est correcte parce qu'elle n'a pas respecté toutes les étapes décrites dans la procédure. Agnès va chercher une chaise pour éviter l'erreur de parallaxe lors du remplissage de la burette. Anne prélève le surplus de solution dépassant le trait de jauge du ballon jaugé au terme de la dilution pour avoir « *le bon volume* ».

La planification est aussi une fonction remplie par ces gestes parasites. Cela peut être lié à une tentative de gain de temps comme pour Agnès qui dit faire ce que dit sa voisine pour « *pas chipoter à chercher* » et éviter de « *perdre du temps pour rien* ». Les gestes peuvent également être fait en prévision d'un travail futur à l'image d'Antoinette prenant note des incertitudes des pièces de verrerie pour compléter son rapport. Enfin, ces gestes sont aussi impliqués dans l'organisation de l'espace de travail. Ainsi, Louis commence à découper des petits papiers qu'il place sous les solutions pour ne pas les confondre. Il n'utilise plus ces papiers dans la suite de la manipulation.

Les questions de sécurité interviennent aussi lorsque les étudiants décrivent les gestes parasites effectués. Par exemple, Georges retire ses bracelets parce que le règlement de laboratoire interdit de porter des bijoux. Certains étudiants vont se déplacer jusqu'à la tourie pour vider leur erlenmeyer, bécher ou burette parce que les produits peuvent être dangereux et qu'il ne faut donc pas les mettre à l'évier. Ils ne pensent pas forcément qu'ils ont un bécher « poubelle ».

Bien entendu, certains de ces actes sont exécutés pour faire l'économie d'autres gestes, surtout lors du TP 5. Louis estime le volume des bulles présentes dans la pipette pour éviter de recommencer le prélèvement. Il va également trafiquer ses valeurs pour éviter de refaire un titrage. Souvent, il s'agit de ne pas recommencer un geste.

A l'opposé, certains étudiants font plusieurs fois le même geste. Souvent, c'est dans l'idée de ne pas commettre d'erreur. Les fonctions remplies sont alors la conformité et la régulation. Par exemple, certains étudiants vérifient plusieurs fois le trait de jauge du ballon jaugé au terme de la dilution.

D'autres fonctions sont présentes mais de manière plus anecdotique. Ainsi en est-il du support à l'investigation. Dans ce cadre, il s'agit alors surtout de comprendre le fonctionnement du matériel comme, par exemple, la pompe à crémaillère ou le porte-burette.

Dans le même ordre d'idée, il arrive, pendant que les étudiants s'activent, qu'ils se posent des questions. Ils font des actes qui ne semblent pas utiles, comme s'ils se donnaient le temps de la réflexion. Les étudiants se demandent quelle(s) pièce(s) de verrerie utiliser ou s'ils doivent effectuer tel geste (agir non étayé), faire tel acte avant tel autre (planification), s'ils ont bien fait ce qu'il faut (régulation), … Ils se posent aussi des questions en rencontrant des problèmes comme Grace lorsqu'elle confond le bécher de solution à titrer avec le bécher « poubelle » lors du remplissage de la burette. Ici, les étudiants cherchent des solutions. Les référents servent de support à l'investigation.

En plus de ces actes qui ne semblent pas servir la manipulation, il y a, dans les gestes parasites, d'autres actes que l'on pourrait qualifier d'organisationnels. Les étudiants déplacent ou rangent des objets, essuient leur table de travail, … Les fonctions de ces actes sont la planification, la conformité, la sécurité, l'agir non étayé et la mise en suspens de la tâche. La plupart des étudiants organisent les objets et solutions sur leur paillasse en vue d'une utilisation ultérieure. Ils font cela dans le but de ne pas confondre les solutions, d'éviter de se tromper, … Ils vont également essuyer leur paillasse pour éviter que leurs affaires ou eux-mêmes n'entrent en contact avec des substances pouvant être dangereuses.

Certains étudiants ont aussi tendance à réorganiser leur table de travail lorsqu'ils cherchent comment réaliser un geste technique ou qu'ils ne savent pas quoi faire. Ils s'occupent. Comme mentionné précédemment, ils restent en action. Peut-être est-ce de nouveau un moyen de se laisser le temps de la réflexion.

Les gestes parasites incluent également des périodes durant lesquelles les étudiants regardent autour d'eux, observent ce qu'il se passe, … Ils observent dans le but de savoir quoi utiliser ou quoi faire. Par exemple, Catherine regarde ses camarades pour savoir ce qu'il faut utiliser pour remplacer la poire à pipeter lors du prélèvement parce qu'elle ne la trouve pas.

Ils vont aussi se servir de leurs pairs pour planifier leurs actes (planification), pour s'assurer que ce qu'ils font est adéquat (régulation) ou pour se situer dans le temps de la manipulation (curseur temporel). Certains étudiants vont également observer les autres pour apprendre par mimétisme. Ainsi, les étudiants profitent de leurs pairs pour avoir un maximum d'informations en les observant mais aussi en écoutant les conversations avec l'encadrant et/ou entre eux.

Les gestes parasites incluent des temps d'attente, des moments durant lesquels l'étudiant semble ne rien faire. En réalité, il apparaît que ces moments d'attente soient plutôt de réflexion. Les étudiants pensent à ce qu'ils sont occupés de faire comme Agnès qui pense qu'elle doit manipuler le robinet de la burette avec douceur pour éviter de rater l'équivalence.

Les étudiants planifient leurs actes, imaginent ce qu'ils doivent faire à l'image de Grace qui dit se refaire la procédure dans sa tête.

Ces moments peuvent aussi servir de balise. Les étudiants se demandent ce qu'ils sont occupés de faire, prennent du recul, se reconcentrent sur la manipulation en cours. En s'arrêtant, il arrive que les étudiants se rendent compte d'une erreur commise, notamment lors du TP 5, TP durant lequel le protocole est fourni. Par exemple, Antoinette se rend compte qu'une dilution se fait dans un ballon jaugé et pas dans un bécher.

Les étudiants attendent aussi lorsqu'ils font appel à l'encadrant. Les fonctions remplies par ce dernier ont déjà été évoquées auparavant.

Enfin, les discussions entre étudiants constituent le dernier type de gestes parasites. Ces discussions ne portent pas forcément sur la manipulation en cours. Ce sont souvent des mises en suspens de la tâche. Les étudiants soufflent, pensent à autre chose. Lors des entretiens, très peu d'étudiants de première année ont pris la parole sur ces moments de discussion. La seule fonction autre que remplissent ces conversations est l'investigation. Les pairs sont utilisés dans le cadre d'une investigation par Jacques lorsqu'ils discutent de l'endroit où ils peuvent mettre l'une des solutions réagissant lorsqu'elle est exposée à la lumière.

4.2.2.2. *En deuxième année (TP acide ascorbique)*

Les gestes parasites des étudiants de deuxième année sont de même nature que ceux qui sont réalisés par les étudiants de première année :

- des erreurs techniques ou des gestes ne figurant pas dans la tâche prescrite ;
- des actes organisationnels ;
- des temps d'observation ;
- des moments d'attente ;
- des discussions.

Il y a un type de gestes parasites qui vient se rajouter. Les étudiants, durant l'activité, effectuent des calculs.

Les fonctions remplies par les actes ne correspondant pas à la tâche prescrite ne sont pas tout à fait les mêmes pour les étudiants de deuxième année que pour ceux de première année.

On ne retrouve pas le souci de la conformité qui poussait certains étudiants à respecter les consignes au pied de la lettre. Il n'y a plus non plus de question de sécurité ni d'économie de gestes. Si les étudiants ont fait une erreur, ils la corrigent quitte à recommencer pour éviter un manque d'exactitude. Il est à noter que ces étudiants sont cotés sur l'exactitude de leurs résultats. Les étudiants de deuxième année connaissant le fonctionnement du matériel mis à disposition, ils n'ont plus besoin des référents comme support à l'investigation dans le cadre de ces actes non décrits dans la procédure experte. Ils ne font plus d'actes parce que l'un de leurs pairs leur a dit de le faire ou parce qu'ils l'ont vu faire. Ainsi, une partie de ce qui constituait un agir non étayé n'est pas exécuté par les étudiants de deuxième année.

Il y a également une différence au niveau de la planification. Cette fonction se retrouve en deuxième année mais, contrairement aux étudiants de première, il n'y a pas de tentative d'organisation de l'espace de travail.

De plus, deux fonctions viennent s'ajouter mais elles sont anecdotiques. Hadrien propose un reste de solution à ses camarades pour éviter le gaspillage et Théodora dit reprendre son souffle c'est-à-dire qu'elle a mis la tâche en suspens alors qu'elle manipule la burette.

Au niveau des actes organisationnels, il y a aussi des fonctions qui ne sont pas remplies lors de l'activité de laboratoire de deuxième et d'autres qui apparaissent. Parmi les fonctions qui ne se retrouvent plus en deuxième année, il y a la sécurité et la mise en suspens de la tâche. Les fonctions qui apparaissent sont la régulation et l'agir étayé. Ces deux nouvelles fonctions se retrouvent dans l'entretien de Nerva. Il dit s'assurer de ce qu'il doit fait en pensant à la procédure tout en déplaçant la pissette d'eau (régulation) et chercher après la puce magnétique pour pouvoir mélanger les solutions en cours de titrage alors qu'il déplace le ballon jaugé (agir étayé). Les autres fonctions sont systématiquement identiques en première et en deuxième année.

Les étudiants de deuxième année observent aussi ce qu'il se passe autour d'eux mais beaucoup moins souvent que les étudiants de première. Les fonctions remplies sont aussi très différentes. Les étudiants de deuxième connaissent les deux techniques de laboratoire qu'ils doivent réaliser. Ils sont habitués à les exécuter. Ils ne regardent plus autour d'eux pour faire ou utiliser ce que leurs pairs font ou utilisent, planifier leurs actes, se situer dans le temps de la manipulation ou obtenir des informations. Par contre, il y a encore des moments de régulation. Certains étudiants regardent autour d'eux pour voir si les autres font la même chose. Ils se soucient aussi de la sécurité de leurs pairs. Lorsqu'il arrive quelque chose, certains étudiants regardent pour voir s'il n'y a pas de problème. Par exemple, Hadrien explique qu'il regarde un de ses camarades qui a fait déborder la

tourie de récupération parce qu'il y a potentiellement des substances dangereuses dedans.

Les temps d'attente remplissent toujours les fonctions de planification et de balise mais il y a également des fonctions qui disparaissent et d'autres qui apparaissent. Ces temps d'attente ne remplissent plus la fonction d'agir non étayé. De plus, ils ne permettent plus aux étudiants de se rendre compte des erreurs qu'ils ont éventuellement commises. Les étudiants rencontrant un problème durant la manipulation vont aussi chercher des solutions durant ces moments à l'exemple de Nerva. Lors d'un titrage, il explique qu'il devrait, selon lui, avoir déjà atteint l'équivalence. Il n'en est rien et en cherche la raison. Le problème de Nerva provient de la cinétique de la réaction qui est un peu lente. C'est ce qu'expliquent Hadrien et Titus. Ils attendent entre chaque ajout de titrant parce que la réaction met un peu de temps à se faire. Ces moments d'attente peuvent aussi être étayés par le déroulement de la manipulation.

Enfin, Hadrien explique que, parfois, les moments d'attente permettent de reprendre son souffle. Dans ce cas, il s'agit de mise en suspens de la tâche.

Comme mentionné dans le paragraphe 2.2 de ce chapitre, en deuxième année, les étudiants n'ont plus autant tendance à faire appel à l'encadrant.

Les périodes de discussion sans lien avec la tâche à réaliser sont beaucoup plus nombreuses en deuxième année qu'en première. Elles permettent toujours de mettre la tâche en suspens et d'investiguer.

Les calculs que peuvent effectuer les étudiants sont aussi considérés comme des gestes parasites. Ils ne sont pas repris dans la description de la tâche à réaliser. Ces calculs servent à la régulation et la planification. Ainsi, Hadrien fait des calculs pour vérifier si la valeur du volume à l'équivalence obtenue concorde avec des résultats eus précédemment. Nerva et Théodora font des calculs pour prévoir leurs résultats.

5. Synthèse

L'analyse de l'activité des étudiants en laboratoire est très riche d'enseignements. Si les différents moments de l'activité sont discriminés, il apparaît qu'une grande partie du temps est allouée à la tâche à réaliser mais aussi à des actes qui ne semblent pas servir la tâche, à des gestes parasites. Le reste du temps est en majeure partie attribué à des périodes de prises d'informations que ce soit par la consultation de la procédure de laboratoire ou par l'interaction avec autrui. Conformément à ce que Vermersch (1985) rapporte dans son article, les étudiants segmentent la tâche, voire même les actions. Il y a atomisation de l'action. Cependant, ces segmentations ne sont pas dues qu'à des

périodes de prise d'informations par la lecture du protocole, comme l'auteur semble le suggérer, mais également par des interactions, qu'elles soient aussi des prises d'informations ou la réponse à une demande d'assistance, et des actes qui ne servent apparemment pas à la réalisation de la tâche. D'un point de vue scientifique, il devient alors difficile de comprendre le but, le sens des actions entreprises, ces dernières étant découpées en parties plus petites n'ayant pas de but si ce n'est de mener à bien les actions correspondantes. Mais est-ce effectivement le cas pour les étudiants ? Ne donnent-ils pas de but à ces actions malgré cette segmentation ?

La proportion de ces actes ne servant apparemment pas la réalisation de la tâche augmente lorsque les étudiants n'ont accès qu'à un protocole succinct et/ou que l'encadrant n'est pas disponible. L'importance des autres ressources auxquelles peuvent se référer les étudiants que sont les vidéos, le matériel, leurs pairs et eux-mêmes se fait alors sentir, notamment au niveau des pairs et du matériel. En début de cursus dans le cadre d'un apprentissage technique, les étudiants ont des difficultés à être autonomes. Par la suite, lorsque les gestes techniques sont en grande majorité acquis, les étudiants font nettement plus preuve d'autonomie, les parties interactionnelles et de lecture du protocole sont limitées à une prise d'information ponctuelle n'ayant généralement pas pour objet la technicité. Pourtant, malgré l'acquisition des gestes techniques, la proportion de temps consacrée aux gestes parasites reste importante.

Se pose alors la question de leur utilité aux yeux des étudiants en plus de se demander si les étudiants connaissent les buts des actions qu'ils exécutent lors de la réalisation des techniques de laboratoire. Ces deux questions impliquent de s'intéresser aux fonctions que les étudiants attribuent à leurs actes. Ces fonctions sont révélées au travers d'entretiens d'autoconfrontation analysés au regard des rôles donnés aux ressources employées. Au fur et à mesure de l'avancée dans le cursus, les étudiants font de moins en moins référence à d'autres ressources qu'eux-mêmes, révélant un apprentissage. L'emploi d'autres référents devient de plus en plus restreint. Les rôles donnés à ces ressources changent également, changeant les fonctions des actes posés.

En début d'apprentissage de la technicité, les étudiants ont tendance à suivre ce qui est dit ou écrit. Ils ont connaissance du but poursuivi par certaines actions mais il arrive que leur agir ne soit étayé que par la consultation des référents. Ils ne savent pas toujours d'eux-mêmes les raisons scientifiques sous-tendant les gestes à effectuer. La diminution des ressources disponibles a donc un impact sur la compréhension des gestes à réaliser et donc, ipso facto, sur l'exécution de ce dernier. Un geste dont l'étudiant ne perçoit pas l'objectif a plus de chance d'être fait inadéquatement ou même de n'être pas effectué du tout. En deuxième année d'études, les étudiants connaissent le pourquoi de

la majorité des gestes techniques réalisés mais ont tendance à les faire par automatisme, ce qui peut engendrer des erreurs, les étudiants quittant partiellement la tâche.
Les gestes parasites, quant à eux, restent importants de par leur diversité. Il y a des gestes techniques inutiles ou erronés, des gestes organisationnels, des temps d'observation, des moments d'attente et des périodes de discussion sans lien avec la tâche. La diminution de temps observée en deuxième année est notamment due à une diminution des gestes techniques inutiles et des temps d'observation. Par contre, ces étudiants quittent plus souvent la tâche à l'occasion de discussion avec un de leurs pairs. Au cours de cette étude, il est apparu que certains gestes parasites ne soient pas inutiles à l'apprentissage. En effet, les temps d'attente et certains gestes réalisés inutilement ont pour objectif de se donner le temps de la réflexion. C'est à ces occasions que l'un ou l'autre étudiant se rend compte d'une erreur commise, ce qui lui laisse l'opportunité d'apprendre de son erreur. Les temps d'observation permettent également un apprentissage. Ce dernier est bien entendu purement pratique, matériel et se fait par mimétisme. Cela ne veut pas dire que tous les gestes parasites soient utiles à l'apprentissage. Les étudiants admettent qu'ils ont besoin, parfois, de souffler un peu, de quitter momentanément la tâche. C'est notamment le cas en deuxième année, les techniques de laboratoire à appliquer devenant triviales.

Ces dissemblances entre les activités exécutées en première année et en deuxième sont donc essentiellement dues à l'expérience plus importante de ces derniers. Elles sont également dues à l'activité même dans laquelle ils sont engagés. Le degré de détail de la procédure de laboratoire, le type d'évaluation, l'objectif de l'activité en tant que telle, … changent l'activité. Cela engendre bien évidemment des variations non seulement au niveau des référents employés mais aussi des fonctions remplies par ces référents. La plupart des différences recensées soulignent quand-même que l'acquisition de compétences techniques ne peut pas se faire en totale autonomie et que la répétition des techniques de laboratoire au travers de différentes activités est nécessaire.

Chapitre 12
Conclusion générale

Une recherche en didactique n'a de raison d'être qu'à partir du moment où le sujet traite d'une difficulté d'apprentissage, d'erreurs commises dans le cadre d'une discipline particulière. Il est donc indispensable de repérer ce qui, dans l'enseignement prodigué, pose problème au travers de traces de l'activité étudiante.

Lors de cette recherche, nous nous sommes intéressés à un type d'activité particulier : les activités expérimentales. Elles représentent l'occasion pour les étudiants d'acquérir différentes connaissances et compétences qu'elles soient techniques, théoriques, scientifiques ou transversales. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à deux notions rencontrées principalement dans ce type d'activité : la précision et l'exactitude. Toutes deux sont liées aux résultats obtenus suite à la manipulation. Un résultat sera d'autant plus précis que le matériel de laboratoire choisi le sera et il sera d'autant plus exact que sa valeur sera proche d'une valeur de référence. Pour être précis et exact, il est nécessaire de choisir le matériel et d'effectuer les gestes techniques de manière adéquate. Reste à faire apparaître la précision et l'exactitude lors de l'écriture des résultats dans les rapports. En ce qui concerne l'exactitude, aucun savoir-faire particulier n'est nécessaire si ce n'est de savoir calculer l'erreur relative. Par contre, le report des valeurs avec une précision adéquate implique l'utilisation de règles qui sont fonction des opérations mathématiques à appliquer.

Ce travail de recherche porte donc sur deux thèmes : l'écriture de résultats avec la précision adéquate et l'acquisition de deux techniques de laboratoire de chimie que sont la dilution et le titrage colorimétrique.

Deux approches ont à chaque fois été adoptées lors de l'étude de ces deux thèmes : une approche centrée sur le savoir et une autre centrée sur l'étudiant. La première implique d'analyser les productions écrites des étudiants où, dans le cas de l'étude portant sur la technicité, les gestes réalisés lors de la manipulation. La seconde est, en quelque sorte, une conséquence de la première. Les observations effectuées engendrent des questions sous la forme « Pourquoi les étudiants… ». Les réponses à ces questions se trouvent en partie dans la manière de penser des étudiants, leurs réflexions lors de l'activité elle-même. Cela nous a poussé à employer des méthodes propres à la théorie de l'activité. Dans le cadre des activités expérimentales, les étudiants sont face à une situation qu'ils transforment au gré des questions qu'ils se posent, des ressources qu'ils consultent, des interactions qu'ils ont les uns avec les autres, … de leur environnement. Au-delà de la tâche prescrite que peut être la transcription de résultats avec une précision adéquate ou la réalisation d'une dilution ou d'un titrage, les étudiants sont amenés à prendre en considération une série de paramètres les poussant à faire des choix. Ces choix peuvent porter sur la consultation d'un outil et sa prise en compte,

les raisonnements mis en place pour mener la tâche à bien, les gestes à effectuer et la manière de les réaliser, … Par leurs décisions, ils transforment continuellement l'activité, ils lui donnent une nouvelle direction. Ces transformations vont engendrer des difficultés et des apprentissages. Ces difficultés et apprentissages apparaissent dans les productions des étudiants qui sont autant de traces de leur activité. Lors de l'analyse de la manière dont les étudiants reportent leurs résultats avec une précision adéquate, ces traces sont des rapports et des tests construits sur base des erreurs repérées. Dans le cas de l'étude portant sur les acquis techniques des étudiants, ce sont des protocoles rédigés par ces étudiants et des films de gestes réalisés en laboratoire.

Ces productions sont le point de départ des analyses centrées sur le savoir. De là se posent des questions sur les erreurs commises ou éventuelles constatations réalisées. La question du « Pourquoi ? » se pose. Pourquoi les étudiants commettent-ils ces erreurs ou pourquoi constate-t-on tel ou tel élément ? Les raisons des erreurs ou constats peuvent être obtenues, en partie, par l'analyse du savoir enseigné. C'est le cas de la transcription de résultats avec une précision adéquate. En effet, les règles sont issues de transpositions didactiques telles que le lien avec la notion d'incertitude a disparu. Ces règles peuvent alors manquer de sens. Cependant, il ne faut pas oublier que ce sont les étudiants qui commettent les erreurs ou sont à l'origine des constats. Ils ont donc aussi une autre partie de la réponse à cette question du « Pourquoi ? ». Là débutent les analyses centrées sur l'étudiant. Ces dernières se font généralement sur base d'entretiens.

La figure 150 (page ci-après) montre le schéma général de la recherche menée dans le cadre de cette thèse.

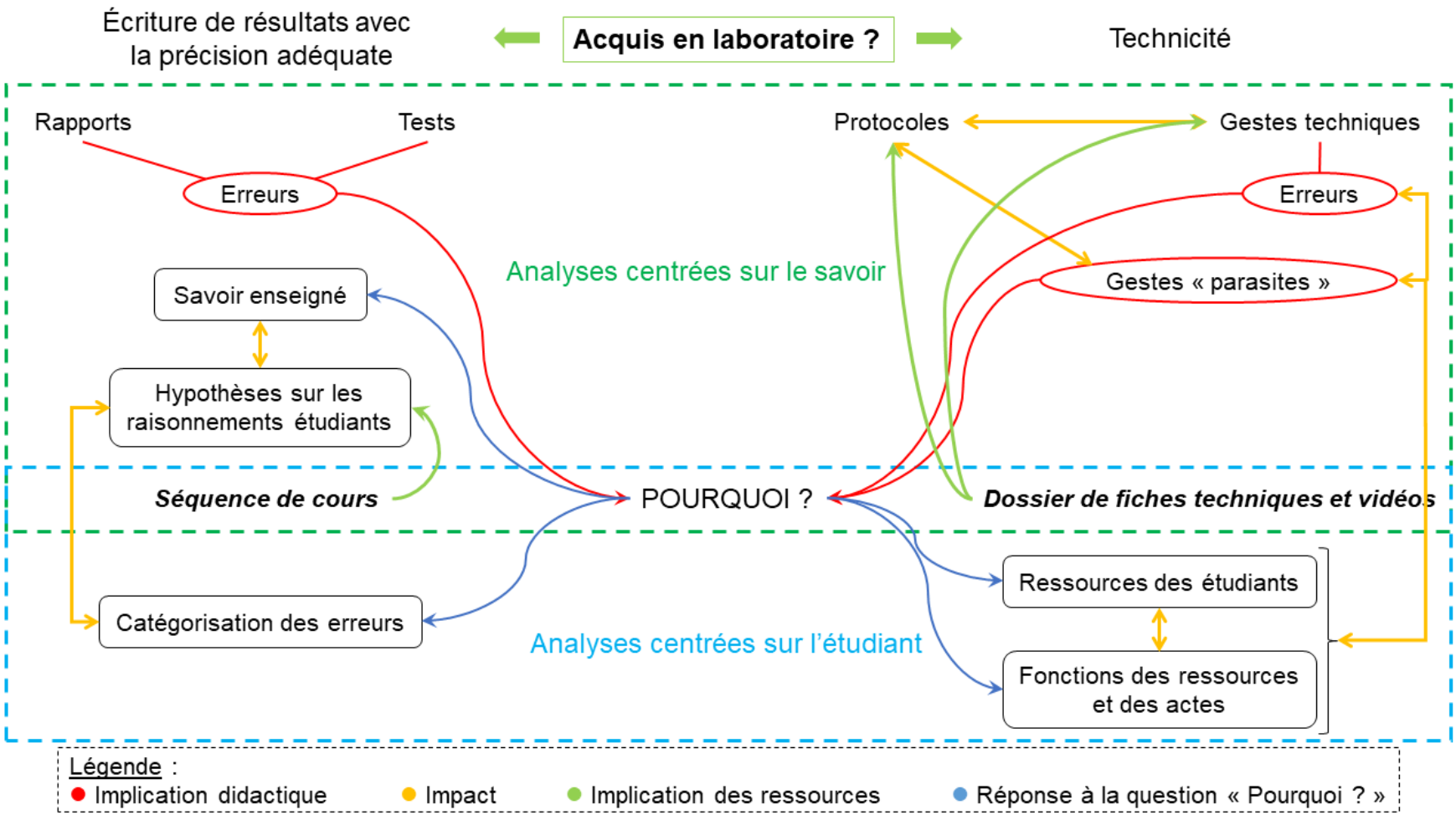


Figure 150 : Schéma général de la recherche sur les acquis en laboratoire

Lors de la transcription de résultats avec une précision adéquate, les étudiants commettent des erreurs. Pour répondre au pourquoi de ces erreurs, nous nous sommes intéressés au savoir enseigné, c'est-à-dire à la provenance des règles. Issues de transpositions didactiques, elles ont perdu tout lien avec le concept d'incertitude qui est pourtant à la base de la précision. De plus, certaines notions présentes dans l'énoncé des règles peuvent engendrer des confusions de par leur ambiguïté, comme le terme « décimale », ou leur nouveauté, à l'instar de la notion de « chiffre significatif ».

Nous avons également posé la question aux étudiants eux-mêmes. Les productions étudiantes et les entretiens nous ont permis de classer les erreurs commises en quatre catégories :

- l'utilisation de la règle inadéquate ;
- la redéfinition des règles par leur opposé ;
- la modification du sens du chiffre « zéro » ;
- le traitement des nombres purs comme des valeurs expérimentales.

Grâce à cette catégorisation et à l'étude du savoir enseigné, des hypothèses ont été posées sur les raisonnements étudiants et un cours en ligne a été créé. L'objectif de ce cours a été de corroborer ou d'infirmer les hypothèses posées.

Parmi ces hypothèses, le manque de sens des règles pourrait expliquer leur utilisation inadéquate. Le cours en ligne permet de diminuer la fréquence de ce type d'erreur mais pas le pourcentage d'étudiants le commettant, laissant penser que le dispositif ne soit pas suffisant pour donner du sens aux règles ou que le savoir enseigné soit trop éloigné du savoir savant.

La crainte de perdre en précision engendrerait la redéfinition des règles par leur opposé. Le cours semble également avoir un impact mais un rappel est indispensable, certains étudiants ayant tendance à renforcer le raisonnement « point » selon lequel il existe une « vraie » valeur.

Enfin, la modification du sens du chiffre « zéro » proviendrait d'une différence de signification de ce chiffre entre sciences expérimentales et mathématiques. Dans ce cas, l'hypothèse n'a pu ni être corroborée, ni infirmée. Un rappel du fait que les « zéros » placés à droite sont indicatifs de la précision des mesures est nécessaire. De manière générale, le cours seul n'a pas de grande influence sur la transcription de résultats avec la précision adéquate. Il est probable qu'il soit nécessaire d'inclure ce cours en ligne dans une structure plus large, incluant une itération de l'application des règles dans d'autres activités de cours que les travaux pratiques.

Il serait également intéressant de regarder à l'influence de différents facteurs sur la compréhension et l'application de ces règles par les étudiants tels que les encadrants, la

prise en compte dans l'évaluation ou l'activité de laboratoire. Sur ce dernier point, il est possible que les étudiants considèrent qu'il ne soit pas nécessaire d'y faire attention lors de toutes les activités expérimentales, peut-être dans d'autres disciplines que la chimie ou lors de travaux pratiques incluant un grand nombre de mesures ou encore lors de séances de laboratoire affichant clairement que l'objectif est un apprentissage soit technique soit purement théorique, … Ils estiment peut-être se trouver dans des situations où il n'est pas indispensable de tenir compte de la précision des résultats.

Dans le cadre de l'acquisition de techniques de laboratoire, nous fournissons diverses ressources sous forme de fiches techniques et de vidéos présentant ces techniques. Ces ressources leur permettent de rédiger leurs propres protocoles de laboratoire et impactent ainsi les gestes réalisés. Les traces de l'activité des étudiants sur lesquelles nous nous sommes basés sont donc ces procédures de laboratoire rédigées ainsi que des vidéos de l'activité en laboratoire. L'analyse des protocoles de laboratoire des étudiants fait ressortir un certain nombre d'éléments pouvant avoir une incidence sur les gestes techniques effectués.

Lorsqu'ils rédigent pour la première fois un protocole expérimental sans connaître les techniques à appliquer si ce n'est théoriquement, ils ont tendance à inclure un grand nombre de détails techniques voire même théoriques. Par la suite, les protocoles rédigés sont plus succincts, ne reprenant généralement que des gestes techniques. Le type de geste technique repris va dépendre de la technique de laboratoire à décrire. Si elle n'implique pas d'itération des gestes, une diminution du nombre d'étudiants reportant les opérations s'accompagnent d'une augmentation de ces pourcentages au niveau des actions. Au contraire, si la technique de laboratoire nécessite une répétition de certains gestes, le nombre d'étudiants diminue tant au niveau des actions que des opérations. Ces protocoles peuvent avoir une incidence sur les gestes techniques des étudiants. En effet, il apparaît que les actes repris dans les protocoles sont généralement réalisés en laboratoire. Ce qui n'est pas réalisé n'est pas non plus écrit mais les étudiants font plus que ce qui est écrit dans le protocole. Cependant, la tâche effectivement réalisée en laboratoire ne correspond pas toujours à la tâche institutionnellement reconnue, la tâche prescrite, même si les étudiants ont rédigé par eux-mêmes le protocole. Cela est encore plus vrai lorsqu'un protocole succinct ne comportant que la tâche à réaliser sans détails opératoires leur est fourni, en tout cas, chez des néophytes. L'importance de ce protocole transparaît dans l'analyse de la tâche effective. Elle transparaît également lors de l'étude globale de l'activité des étudiants en laboratoire. Ces actes ont été catégorisés :

- la technicité ;
- les interactions ;

- la lecture du protocole ;
- les gestes parasites ;
- les actes sans thématiques.

Lorsqu'un protocole succinct est fourni, la proportion de temps consacrée aux actes ne servant pas la manipulation, les gestes parasites, augmente. On pourrait penser que la raison en est le manque d'entraînement des étudiants. Et pourtant, les étudiants de deuxième année qui connaissent ces techniques de laboratoire pour les avoir exécutées un certain nombre de fois font eux aussi des gestes parasites. C'est là qu'apparaissent les « Pourquoi ? » Pourquoi les étudiants font-ils ces gestes parasites ? Et sur les gestes techniques, les étudiants sont-ils conscients des buts de ces gestes ? Si ce n'est pas le cas, cela peut éventuellement expliquer les erreurs commises. Il est alors possible de se demander pourquoi ils exécutent ces gestes.

Pour expliquer ces actes, la procédure de laboratoire seule ne suffit donc pas. Les étudiants font appel à d'autres référents tels que des vidéos, le matériel, l'encadrant, les pairs et eux-mêmes.

Ces référents remplissent diverses fonctions selon la situation et l'environnement de l'étudiant lors de l'activité. Au niveau des gestes techniques, il est assez rare que les étudiants débutant des études supérieures dans un domaine scientifique connaissent les buts poursuivis par les actions qu'ils effectuent. La plupart du temps, ils ont cette information au travers des référents qu'ils emploient. Dans la suite du cursus, une fois entraînés, les étudiants connaissent généralement les buts de ces actions qu'ils font parfois par automatisme. En ce qui concerne les gestes parasites, ils restent nombreux de par leur diversité : gestes techniques inutiles ou erronés et organisationnels ainsi que des moments d'observation, d'attente et de discussion sans lien avec la tâche. Les objectifs de ces gestes sont forcément différents en fonction du type de geste parasite. Les fonctions remplies par ces gestes sont également très diverses et ne sont pas tout à fait identiques pour des étudiants novices ou des étudiants plus expérimentés. En première année, les étudiants font un certain nombre de gestes inutiles et observent beaucoup leurs pairs. Ces gestes sont apparus comme ayant leur importance dans l'apprentissage. En deuxième année, les étudiants quittent plus souvent la tâche à l'occasion de discussion sans lien avec la tâche. Ils disent avoir acquis des automatismes et ne plus devoir réfléchir à ce qu'ils font. En première année, il arrive également que les étudiants quittent la tâche mais ce n'est pas parce qu'ils connaissent les gestes à réaliser. Quel que soit le degré d'expertise, les étudiants ont besoin de déconnecter, de faire autre chose avant de revenir à la tâche proprement dite.

Au travers des témoignages des étudiants lorsqu’ils sont amenés à mettre en récit leur activité, il apparaît que l’acquisition de compétences techniques se fassent effectivement par l’itération de la tâche dans différentes situations d’apprentissage.

Les entretiens peuvent aussi donner des informations sur les raisonnements des étudiants lorsqu’ils manipulent. Il serait intéressant d’y porter attention. Lors de chacune de ses actions, l’étudiant transforme son environnement. Lorsqu’un problème survient, il se retrouve dans ce que John Dewey, dans sa théorie de l’enquête, a appelé une situation indéterminée. L’étudiant va alors devoir chercher les éléments qui rendent cette situation indéterminée, il va émettre des hypothèses et les tester. Ces hypothèses deviennent des idées lorsqu’elles sont vérifiées et que l’étudiant en connaît les conditions d’application. La situation cesse alors d’être indéterminée mais de manière temporaire. En effet, l’étudiant, par son action, continue à transformer son environnement. L’étudiant, lors d’une activité expérimentale, est continuellement occupé d’enquêter, de raisonner.

Bibliographie

Abraham, M. R. (2011). What can be learned from laboratory activities? Revisiting 32 years of research. *Journal of Chemical Education*, *88*(8), 1020–1025. https://doi.org/10.1021/ed100774d

Adnet, M., Bada, M., Capelle, P., De Permentier, M., Godts, P., Hannecart, L., … Waterloo, D. (2014). Programme - Sciences générales 2eme degré. Bruxelles: Enseignement catholique secondaire.

Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, *9*(3), 291–308.

Astier, P., Gal-Petitfaux, N., Leblanc, S., Sève, C., Saury, J., & Zeitler, A. (2003). Les approches situées de l'action : quelques outils. *Recherche & Formation*, *42*(1), 119–125. https://doi.org/10.3406/refor.2003.1833

Atkins, P., & Jones, L. (2007). *Chimie : Molécules, matière, métamorphoses*. Bruxelles: De Boeck Université.

Bally, F.-X., & Berroir, J.-M. (2010). Incertitudes expérimentales. *Bulletin de l'union Des Professeurs de Physique et de Chimie*, *104*, 995–1019. Retrieved from http://poisson.ens.fr/Ressources/incertitudes.pdf

Barchiesi, D. (2004). Incertitudes de mesure : une approche normative. *Bulletin de l'union Des Professeurs de Physique et de Chimie*, *98*, 653–661.

Barnett, R. A., Ziegler, M. R., & Byleen, K. E. (2015). *College Mathematics for Business, Economics, Life Sciences, and Social Sciences*. England: Pearson Education Limited.

Barwick, V., Magnusson, B., Örnemark, U., Patriarca, M., & Prichard, E. (2011). *Terminology in Analytical Measurement - introduction to VIM 3*. (V. Barwick & E. Prichard, Eds.), *Guidance Document*. Retrieved from www.eurachem.org.

Bé, M. M., Blanchis, P., & Dulieu, C. (2004). *Arrondissage des résultats de mesure - Nombre de chiffres significatifs*. Gif-sur-Yvette. Retrieved from http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Arrondis_NT04-13.pdf

Bensaude-Vincent, B., & Stengers, I. (1995). *Histoire de la chimie* (La découve). Paris.

Bessot, A. (2015). Une introcution à la didactique. Grenoble: université Grenoble Alpes.

Biansan, J.-M., Blat, S., Nicoules, C., & Olive, J.-F. (2017). Notion d'erreurs et d'incertitudes en sciences expérimentales. Toulouse. Retrieved from https://disciplines.ac-toulouse.fr/physique-chimie/sites/physique-chimie/files/fichiers/stage_mesures_et_incertitudes/support_prof-stage_paf-fevrier2017.pdf

Bosch, M., & Chevallard, Y. (1999). La sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, *19*(1), 77–124.

Brossard, M. (2004). Chapitre 4. Apprentissage et développement. In *Vygotski - Lectures et perspectives de recherches en éducation* (Presses un, p. 256). Villeneuve d'Ascq. https://doi.org/10.4000/books.septentrion.14157

Brousseau, G. (1997). La théorie des situations didactiques (Cours donné lors de l'attribution du titre de Docteur Honoris Causa de l'Université de Montréal). *Interactions Didactiques*, 1–57.

Capelle, P., Clavier, S., Cornet, M., Godts, P., Hannecart, L., Hautier, P., … Vercruysse, N. (2016). Programme - Sciences générales 3eme degré. Bruxelles: Enseignement catholique secondaire.

Castiaux, M., Close, P., & Janssens, R. (2008). *Maths 1/2 Manuel*. Bruxelles: De Boeck.

Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. (2012a). Décimal, ale, aux.

Retrieved from https://www.cnrtl.fr/definition/décimal
Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. (2012b). Précision. Retrieved from https://www.cnrtl.fr/definition/précision
Chaachoua, H. (2010). *La praxéologie comme modèle didactique pour la problématique EIAH . Etude de cas : la modélisation des connaissances des élèves*. Université Joseph Fourier (Grenoble I), Grenoble.
Chaachoua, H. (2018a). T4TEL : Un cadre théorique pour la formalisation et l'extension du modèle praxéologique. In *6° congrès international sur la théorie anthropologique du didactique* (pp. 400–414). Autrans, France.
Chaachoua, H. (2018b). T4TEL un cadre de référence didactique pour la conception des EIAH. In J. Pilet & C. Vendeira (Eds.), *Pré-actes du séminaire de didactique des mathématiques* (pp. 5–22).
Champy-Remoussenard, P. (2005). Les théories de l'activité entre travail et formation. *Savoirs*, *8*(2), 9–50. https://doi.org/10.3917/savo.008.0009
Chen, C. M., & Wu, C. H. (2015). Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance. *Computers and Education*, *80*, 108–121. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.08.015
Chevallard, Y. (1982). Pourquoi la transposition didactique ? In *Séminaire de didactique et de pédagogie des mathématiques* (pp. 167–194).
Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une apporche anthropologique. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, *12*(1).
Chevallard, Y. (1994). Ostensifs et non-ostensifs dans l'activité mathématique. In *Actes du Séminaire de l'Associazione Mathesis* (pp. 190–200). Thurin.
Chevallard, Y. (1998). Analyse des pratiques enseignantes et didactique des mathématiques: l'approche anthropologique. In *Actes de l'École d'été de la Rochelle* (pp. 91–120). Retrieved from http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Analyse_des_pratiques_enseignantes.pdf
Chevallard, Y. (2003). Approche anthropologique du rapport au savoir et didactique des mathématiques. In S. Maury & M. Caillot (Eds.), *Rapport au savoir et didactiques* (pp. 81–104). Paris: Fabert. Retrieved from http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/Approche_anthropologique_rapport_au_savoir.pdf
Chevallard, Y., & Johsua, M.-A. (1991). *La transposition didactique - du savoir savant au savoir enseigné* (La Pensée). Fontenay-le-Comte.
Clase, H. J. (1993). More on the question of significant figures. *Journal of Chemical Education*, *70*(2), 133. https://doi.org/10.1021/ed070p133
Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., & Lahanier-Reuter, D. (2013). Transposition didactique. In Y. Reuter (Ed.), *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques* (3eme éditi, p. 280). Bruxelles: De Boeck.
Croset, M.-C., & Chaachoua, H. (2016). Une réponse à la prise en compte de l'apprenant dans la TAD: La praxeologie personnelle. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, *36*(2), 161–196.
Dafermos, M. (2015). Activity theory - Theory and practice. In I. Parker (Ed.), *Handbook of critical psychology* (Routledge, pp. 261–270). London and New York. https://doi.org/10.5860/choice.194052

Delen, E., Liew, J., & Willson, V. (2014). Effects of interactivity and instructional scaffolding on learning: Self-regulation in online video-based environments. *Computers and Education*, *78*, 312–320. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.06.018

Domin, D. S. (1999). A Review of laboratory instruction styles. *Journal of Chemical Education*, *76*(4), 543. https://doi.org/10.1021/ed076p543

Durand, M. (2007). Situations de l 'action, dispositions à agir et trajectoires d ' activité chez des enseignants débutants et des formateurs de terrain. *Formation et Pratiques d'enseignement En Questions*, *6*, 83–98. Retrieved from http://revuedeshep.ch/site-fpeq/Site_FPEQ/6_files/2007-6-Durand.pdf

Engeström, Y. (2000). Activity theory as a framework for analyzing and redesigning. *Ergonomics*, *43*(7), 960–974. https://doi.org/10.1080/001401300409143

Engeström, Y. (2001). Expansive Learning at Work: Toward an activity theoretical reconceptualization. *Journal of Education and Work*, *14*(1), 133–156. https://doi.org/10.1080/13639080123238

Evangelinos, D., Psillos, D., & Valassiades, O. (2002). An investigation of teaching and learning about measurement data and their treatment in the introductory physics laboratory. In D. Psillos & H. Niedderer (Eds.), *Teaching and Learning in the Science Laboratory* (pp. 179–190). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.5688/ajpe80459

Girault, I., D'Ham, C., Ney, M., Sanchez, E., & Wajeman, C. (2012). Characterizing the experimental procedure in science laboratories: a preliminary step toward students experimental design. *International Journal of Science Education*, *34*(6), 825–854.

Giuseppin, M. (1996). Place et rôle des activités expérimentales en sciences physiques. *Didaskalia*, *9*, 107–118.

Golde, M. F., McCreary, C. L., & Koeske, R. (2006). Peer Instruction in the General Chemistry Laboratory: Assessment of Student Learning. *Journal of Chemical Education*, *83*(5), 804–810. https://doi.org/10.1021/ed083p804

Griffin, D. K., Mitchell, D., & Thompson, S. J. (2009). Podcasting by synchronising PowerPoint and voice: What are the pedagogical benefits? *Computers and Education*, *53*(2), 532–539. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.03.011

Guare, C. J. (1991). Error, precision, and uncertainty. *Journal of Chemical Education*, *68*(8), 649–652.

Guymon, E. P., James, H. J., & Seager, S. L. (1986). Teaching significant figures using a learning cycle. *Journal of Chemical Education*, *63*(9), 786–787.

Harwood, W. S., & McMahon, M. M. (1997). Effects of integrated video media on student achievement and attitudes in high school chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, *34*(6), 617–631. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199708)34:6<617::AID-TEA5>3.0.CO;2-Q

Hasan, H., & Kazlauskas, A. (2014). Activity Theory: who is doing what, why and how. In H. Hasan (Ed.), *Being practical with theory: A window into business research* (pp. 9–14). Wollongong, Australia: THEORI.

Hashim, N. H., & Jones, M. L. (2007). Activity theory : a framework for qualitative analysis. In *International Qualitative Research Convention*. PJ Hilton, Malaysia. https://doi.org/10.1007/s10620-008-0545-y

He, W., Holton, A., Farkas, G., & Warschauer, M. (2016). The effects of flipped instruction on out-of-class study time, exam performance, and student perceptions. *Learning and Instruction*, *45*, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.07.001

Hecht, E. (1999). *Physique*. Bruxelles: De Boeck Université.
Hecht, E. (2000). *Physics : Calculus*. United States of America: Brooks/Col.
Heilesen, S. B. (2010). What is the academic efficacy of podcasting? *Computers and Education*, *55*(3), 1063–1068. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.002
Hill, J. W., Petrucci, Ralph, H., McCreary, T. H., & Perry, S. S. (2008). *Chimie des solutions* (Editions d). Québec.
Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (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
Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Retrieved from https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf
Joint Committee For Guides In Metrology. (2012). *Vocabulaire international de métrologie*. *VIM3: International Vocabulary of Metrology* (Vol. 3). https://doi.org/10.1016/0263-2241(85)90006-5
Kaptelinin, V. (1996). Activity theory: Implications for human-computer interaction. In B. A. Nardi (Ed.), *Contexte and consciousness: Activity theory and human-computer interaction* (pp. 53–59). Cambridge: MIT Press.
Kaptelinin, V., Kuutti, K., & Bannon, L. (1995). Activity theory: Basic concepts and applications. In B. Blumenthal, J. Gornostaev, & C. Unger (Eds.), *Human-Computer Interaction* (pp. 189–201). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-60614-9_14
Kay, R. H. (2012). Exploring the use of video podcasts in education: A comprehensive review of the literature. *Computers in Human Behavior*, *28*(3), 820–831. https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.01.011
Kay, R. H. (2014). Developing a framework for creating effective instructional video podcasts. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, *9*(1), 22–30. https://doi.org/10.3991/ijet.v9i1.3335
Keys, C. W. (1999). Revitalizing instruction in scientific genres: Connecting knowledge production with writing to learn in science. *Science Education*, *83*(2), 115–130. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199903)83:2<115::AID-SCE2>3.0.CO;2-Q
Lagowski, J. (2002). The role of the laboratory in chemical education. Retrieved September 5, 2014, from http://www.utexas.edu/research/chemed/lagowski/jjl_beijing_02.pdf
Larousse. (n.d.). précision. Retrieved from https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/précision/63354
Le Maréchal, J.-F., & Rym, N. (2008). La mesure dans l'enseignement des sciences physiques. *Aster*, *47*, 103–130.
Leplat, J., & Hoc, J.-M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, *3*(1), 49-63.
Librairie des Sciences de l'Université de Namur. (2011). *Chimie générale - Laboratoire*. Namur.
Lide, D. R. (Ed.). (2009). *CRC Handbook of chemistry and Physics* (90th ed.). Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis.
Lloyd, B. W. (1992). The 20th century general chemistry laboratory: Its various faces. *Journal of Chemical Education*, *69*(11), 866. https://doi.org/10.1021/ed069p866
Marzin, P., Girault, I., Wajeman, C., D'Ham, C., Sanchez, E., & Cross, D. (2007).

L'utilisation d'un arbre des tâches pour concevoir et analyser des situations d'apprentissage : trois T.P. intégrant la conception d'un protocole expérimental par les élèves en géologie, chimie et physique. In *Journées de l'ARDIST 2007* (pp. 257–264). La Grande Motte, France.

Maurel, M. (2013). La psycho-phénoménologie, théorie de l'explicitation. *Journal of Philosophy & Science*, 199–212.

McGarr, O. (2009). A review of podcasting in higher education: Its influence on the traditional lecture. *Australasian Journal of Educational Technology*, *25*(3), 309–321. https://doi.org/10.14742/ajet.1136

McQuarrie, D., & Rock, P. A. (2007). *Chimie générale*. Bruxelles: De Boeck Université.

Mendham, J., Denney, R. C., Barnes, J. D., & Thomas, M. (2006). *Analyse chimique quantitative de Vogel*. Bruxelles: De Boeck Université.

Midden, W. R. (1997). Rounding numbers : Why the "new system" doesn't work. *Journal of Chemical Education*, *74*(4), 405.

Ministère de l'éducation nationale de la jeunesse et de la vie associative. (2012). Ressources pour le cycle terminal général et technologique : Mesures et incertitudes. Retrieved from http://national.udppc.asso.fr/attachments/article/537/_ressources_MathPC_Mesure_et_incertitudes_eduscol_214070.pdf

Moreau, R. (2001). Mesures, erreurs et incertitudes en physique-chimie. In *Actes de l'Université d'été 9 - 13 juillet 2001*. Cachan.

Mouchet, A. (2016). Comprendre l'activité en situation : articuler l'action et la verbalisation de l'action. *Savoirs*, *40*(1), 9–70. https://doi.org/10.3917/savo.040.0009

Munier, V., Chesnais, A., & Molvinger, K. (2014). Mesure et incertitudes en mathématiques et en physique à la transition école-collège : éléments d'épistémologie et difficultés des élèves. *Skholê : Cahiers de La Recherche et Du Développement*, *18*(1), 451–458.

National Research Council. (1996). *National Science Education Standards*. *Science Education*. https://doi.org/0-309-54985-X

National Research Council. (2006). *America's Lab Report: Investigations in High School Science*. (S. R. Singer, M. L. Hilton, & H. A. Schweingruber, Eds.). Washington D.C.: National Academies Press. https://doi.org/10.17226/661

Nosulenko, V., & Rabardel, P. (2007). *Rubinstein aujourd'hui - Nouvelles figures de l'activité humaine* (Octarès Ed).

Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2004). Cognitive Load Theory: Instructional Implications of the Interaction between Information Structures and Cognitive Architecture. *Instructional Science*, *32*, 1–8. https://doi.org/10.1023/B:TRUC.0000021806.17516.d0

Pacer, R. A. (2000). How can an instructor best introduce the topic of significant figures to students unfamiliar with the concept? *Journal of Chemical Education*, *77*(11), 1435. https://doi.org/10.1021/ed077p1435

Pastré, P. (2002). L'analyse du travail en didactique professionnelle. *Revue Francaise de Pedagogie*, *138*, 9–17. https://doi.org/10.3406/rfp.2002.2859

Pastré, P. (2011a). La didactique professionnelle - Un point de vue sur la formation et la professionnalisation. *Education Sciences & Society*, *2*(1), 83–95. https://doi.org/10.3917/puf.faber.2011.01

Pastré, P. (2011b). Situation d ' apprentissage et conceptualisation. *Recherches En*

Education, *12*, 12–25.

Paun, E. (2006). Transposition didactique : un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l'éducation*, *22*(2), 3–13. Retrieved from https://www.cairn.info/revue-carrefours-de-l-education-2006-2-page-3.html

Pernot, C. (1993). Une gestion de l'apprentissage de la chimie expérimentale en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, *2*, 101–109.

Perrenoud, P. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques : des savoirs aux compétences. *Revue Des Sciences de l'éducation*, *24*(3), 487–514. Retrieved from https://www.cairn.info/revue-carrefours-de-l-education-2006-2-page-3.html

Philippe, J. (2004). La transposition didactique en question : pratiques et traduction. *Revue Française de Pédagogie*, *149*, 29–36. https://doi.org/10.3406/rfp.2004.3170

Pirson, P., Bordet, H., Castin, D., & Snauwaert, P. (2015). *Chimie 3e : Sciences générales* (De Boeck). Louvain-la-Neuve.

Reid, N., & Shah, I. (2007). The role of laboratory work in university chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, *8*(2), 172–185. https://doi.org/10.1039/B5RP90026C

Satek, L. C. (1977). Calculators and significant figures. *Journal of Chemical Education*, *54*(3), 177. https://doi.org/10.1021/ed054p177

Schoefs, O., Buiron, N., & Favergeon, J. (2016). Chapitre 2 : Notions de métrologie. Retrieved from https://ics.utc.fr/PS90/chapitre 2/co/module_chap2.html

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. https://doi.org/10.1002/sce.10040

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

Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, J. F. (1997). *Chimie analytique*. Bruxelles: De Boeck Université.

Stephenson, W. K. (2009). The box-and-dot method: A simple strategy for counting significant figures. *Journal of Chemical Education*, *86*(8), 933–935. https://doi.org/10.1021/ed086p933

Sternheim, M. M., & Kane, J. W. (1991). *General physics* (John Wiley). United States of America.

Svensson, C. (2004). How Many Digits Should We Use in Formula or Molar Mass Calculations? *Journal of Chemical Education*, *81*(6), 827. https://doi.org/10.1021/ed081p827

Swokowski, E. W., & Cole, J. A. (1999). *Algèbre*. Bruxelles: De Boeck Université.

Taylor, J. (2000). *Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques* (Dunod). Paris.

Theureau, J. (1996). Cours d'action et savoir-faire. In D. Chevallier (Ed.), *Savoir faire et pouvoir transmettre : Transmission et apprentissage des savoir-faire et des techniques* (p. 265). Paris: Éditions de la Maison des sciences de l'homme. https://doi.org/10.4000/books.editionsmsh.3818

Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J. F., Buty, C., & Millar, R. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several european countries. *Science Education*, *85*(5), 483–508. https://doi.org/10.1002/sce.1020

Treptow, R. S. (1980). Significant figures : removing the zero mystique. *Journal of Chemical Education*, *57*(9), 646. https://doi.org/10.1021/ed057p646

Tro, N. J. (2015). *Principes de Chimie. Une approche moléculaire.* Canada: Pearson ERPI.

Tsaparlis, G., & Gorezi, M. (2007). Addition of a Project-Based Component to a Conventional Expository Physical Chemistry Laboratory. *Journal of Chemical Education*, *84*(4), 668. https://doi.org/10.1021/ed084p668

Tuovinen, J. E., & Sweller, J. (1999). A comparison of Cognitive Load Associated With Discovery Learning and Worked Examples. *Journal of Educational Psychology*. https://doi.org/10.1037/0022-0663.91.2.334

Venturini, P. (2012). Action, activité, "agir" conjoints en didactique : discussion théorique. *Education & Didactique*, *6*(1), 127–136. https://doi.org/10.4000/educationdidactique.1348

Vermersch, P. (1985). Donnée d'observation sur l'utilisation d'une consigne écrite : l'atomisation de l'action. *Le Travail Humain*, *48*(2), 161–172.

Vermersch, P. (1996). Pour une psycho phénoménologie. *Expliciter*, *13*, 1–16.

Vermersch, P. (1997). Glossaire. *Expliciter*, *18*, 1–16.

Vermersch, P. (2004). Prendre en compte la phénoménalité: propositions pour une psycho phénoménologie. *Expliciter*, *57*, 35–46.

Vérot, M. (n.d.). Mesure, erreur, incertitude. Retrieved from http://agregationchimie.free.fr/fichiers/cours_incertitudes.pdf

Wieling, M. B., & Hofman, W. H. A. (2010). The impact of online video lecture recordings and automated feedback on student performance. *Computers and Education*, *54*(4), 992–998. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.10.002

Wouters, J. (2015). *Concentré de chimie* (Presses un). Namur.

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2004). *Sears ans Zemansky's university physics with modern physics* (Pearson). San Francisco.

Young, H. D., & Geller, R. M. (2006). *Sears and Zemansky's college physics*. San Francisco: Pearson.

Zipp, A. P. (1992). A simple but effective demonstration for illustrating significant figure rules when making measurements and doing calculations. *Journal of Chemical Education*, *69*(4), 291. https://doi.org/10.1021/ed069p291

Images employées :

[1] Cégep de Sainte-Foy. La physique en ligne. Retrieved from http://www2.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoy/labo/incertitudes/incertitudes.html

[2] Sweet Life. DC 0-30V Durable Mini Analog Voltmeter. Retrieved from https://www.aliexpress.com/store/product/DC-0-30V-Durable-Mini-Analog-Voltmeter-Voltage-Panel-Meter-Tester-For-Experimeent-or-Home-Use/1841016_32436810053.html

[3] Doyen, G. (2012). Comment peut-on savoir si une découverte est vraiment significative ?. Retrieved from https://guydoyen.fr/2012/02/09/comment-peut-on-savoir-si-une-decouverte-est-vraiment-significative/

[4] Schoefs, O., Buiron, N., & Favergeon, J. (2016). Chapitre 2 : Notions de métrologie. Retrieved from https://ics.utc.fr/PS90/chapitre 2/co/module_chap2.html

[5] Sawakinome. Différence entre la dilution et la concentration. Retrieved from https://fr.sawakinome.com/articles/general-chemistry/difference-between-dilution-and-concentration.html

[6] La Boîte à Physique (2017). Réalisation de solutions par dilution. Retrieved from https://laboiteaphysique.fr/Fiches/Fiches_dilution.pdf

[7] La Boîte à Physique (2017). Le dosage direct. Retrieved from https://laboiteaphysique.fr/Fiches/Fiche_dosage_direct.pdf

[8] Wikipédia (2019). Zone proximale de développement. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Zone_de_D%C3%A9veloppement_Proche_-_Notion_du_p%C3%A9dagogue_sovi%C3%A9tique_Lev_Vygotski.png

Les annexes sont présentes sur le site du CeFoSciM : https://www.cefoscim.be/