

Création d'une séquence de cours informatisée pour reporter des résultats expérimentaux avec la précision adéquate

Céline, Picron

Université de Namur

Unité de Recherche en Didactique de la Chimie, Institut de Recherche en Didactiques et Éducation de l'Université de Namur (IRDENa)

Philippe, Snauwaert

Université de Namur

Unité de Recherche en Didactique de la Chimie, Institut de Recherche en Didactiques et Éducation de l'Université de Namur (IRDENa)

Mots clés (4 à 6)

Précision – Incertitude – Vidéo – Activité expérimentale – Encadrant

Présentation de la problématique

Les activités expérimentales poursuivent divers objectifs d'apprentissage dont celui de savoir reporter des résultats expérimentaux avec la précision adéquate. En première année d'études supérieures dans un domaine scientifique, cet apprentissage débute généralement par l'enseignement de règles à appliquer qui sont fonction de l'opération mathématique (Skoog, West & Holler, 1997) :

- 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.

Malgré l'itération de leur usage lors des différentes séances de laboratoire, les étudiants ont des difficultés à les respecter, comme reporté dans divers articles (Clase, 1993, Guiseppin, 1996, Guare, 1991; Guymon James & Seager, 1986, Pacer, 2000, Satek, 1977; Treptow, 1980, Zipp, 1992) et mentionné lors d'une étude préliminaire (Figure 1).

10. Quels seraient les points à améliorer ?

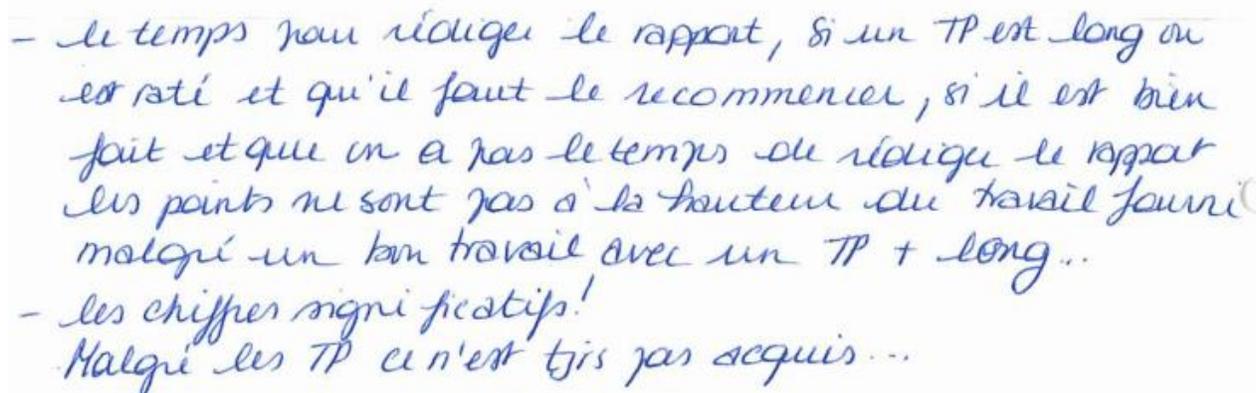
- 
- le temps pour rédiger le rapport, si un TP est long on est fatigué et qu'il faut le recommencer, si il est bien fait et que on a pas le temps de rédiger le rapport les points ne sont pas à la hauteur du travail fourni malgré un bon travail avec un TP + long...
 - les chiffres significatifs!
Malgré les TP ce n'est tjrs pas acquis...

Figure 1 : Réponse d'un étudiant inscrit en sciences pharmaceutiques lors de l'étude préliminaire (2014-2015)

Ces difficultés ont été recensées suite à l'analyse de rapports de laboratoire et à l'aide d'un test effectués auprès de 85 étudiants inscrits en première année d'études en sciences biomédicales et en sciences pharmaceutiques en 2016-2017 dans le cadre d'analyses préalables. Des entretiens d'explicitation ont

également été menés. Les données recueillies 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.

Un étudiant utilise une règle inadéquate lorsqu'il applique la règle à utiliser dans les opérations d'addition et/ou de soustraction lors d'opérations de multiplication et/ou de division et vice-versa (Figure 2)

$$13,6 \cdot 18,500 = 251,6 \text{ mg} \quad | \quad 20,0 + 273,15 = 293 \text{ K}$$

Figure 2 : Inversion des règles lors d'opérations de multiplication et d'addition (copies d'étudiants de 2016-17)

Il y a redéfinition des règles par leur opposé lorsque les résultats sont reportés avec un maximum de décimales ou de chiffres significatifs (Figure 3)

$$\frac{95}{13,6} = 6,98 \quad | \quad T(K) = 19,8 + 273,15 = 290,95 \text{ K}$$

Figure 3 : Redéfinition des règles par leur opposé lors d'une division et d'une addition (copies d'étudiants de 2016-17)

Il arrive que les étudiants modifient la signification du chiffre « zéro » comme dans la figure 4. Pour rappel, en sciences expérimentales, seuls les zéros situés à droite du dernier chiffre non nul sont significatifs car ils sont indicatifs de la précision de l'instrument de mesure employé. Dans la figure 4, l'étudiant a probablement considéré que les zéros à gauche du premier chiffre non nul étaient significatifs.

$$m = \frac{721 \cdot 0,428}{62,36 \cdot 293,8} = 0,02 \text{ mol}$$

Figure 4: Modification de la signification du chiffre « zéro » lors du calcul d'une quantité de matière (copie d'étudiant de 2016-17)

Lorsqu'ils effectuent des calculs, certains étudiants vont considérer toutes les valeurs comme étant obtenues expérimentalement. Dans la figure 5, les chiffres 2 et 3 proviennent de coefficients stœchiométriques. Ce ne sont donc pas des valeurs obtenues expérimentalement. Pourtant, l'étudiant s'est basé dessus pour définir la précision du résultat.

$$0,074 \cdot \frac{2}{3} = 0,10^{-3} \text{ mol}$$

Figure 5 : Impact des nombres purs sur la précision du résultat (copie d'étudiant de 2016-17)

Les hypothèses émises pour expliquer ces erreurs sont le manque de sens des règles, la crainte de perdre en précision, la différence de signification du chiffre « zéro » en sciences expérimentales et mathématiques et la croyance qu'il faut tenir compte de toutes les valeurs du calcul pour déterminer la précision du résultat.

Pour favoriser l'acquisition des notions nécessaires à l'écriture de résultats avec une précision adéquate, une séquence de cours en ligne composée de 6 vidéos, d'exercices et de 2 fiches a été créée sur une plateforme de cours. La méthodologie employée est celle de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). La séquence de cours a donc été construite sur base d'analyses préalables dont une partie des résultats est présentée précédemment et d'analyses a priori. Les vidéos ont été faites sur base de quatre critères établis par Kay (2014) : le contexte doit être signifiant, les explications claires, la charge cognitive minimisée et les

paramètres propices à l'engagement des étudiants. De plus, elles poursuivent chacune un ou des objectifs particuliers tels que :

- exposer et illustrer les concepts d'incertitude et de précision (vidéos 1, 2 et 4) ;
- énoncer, donner du sens aux règles et les illustrer (vidéos 2 et 4) ;
- expliciter le sens du chiffre « zéro » en montrant la distinction existant entre sciences expérimentales et mathématiques (vidéo 3) ;
- faire la distinction entre un nombre pur, valeur non obtenue expérimentalement, et valeur expérimentale tabulée (vidéo 5) ;
- présenter une méthode à appliquer (vidéo 6).

Cette séquence est présentée à la figure 6

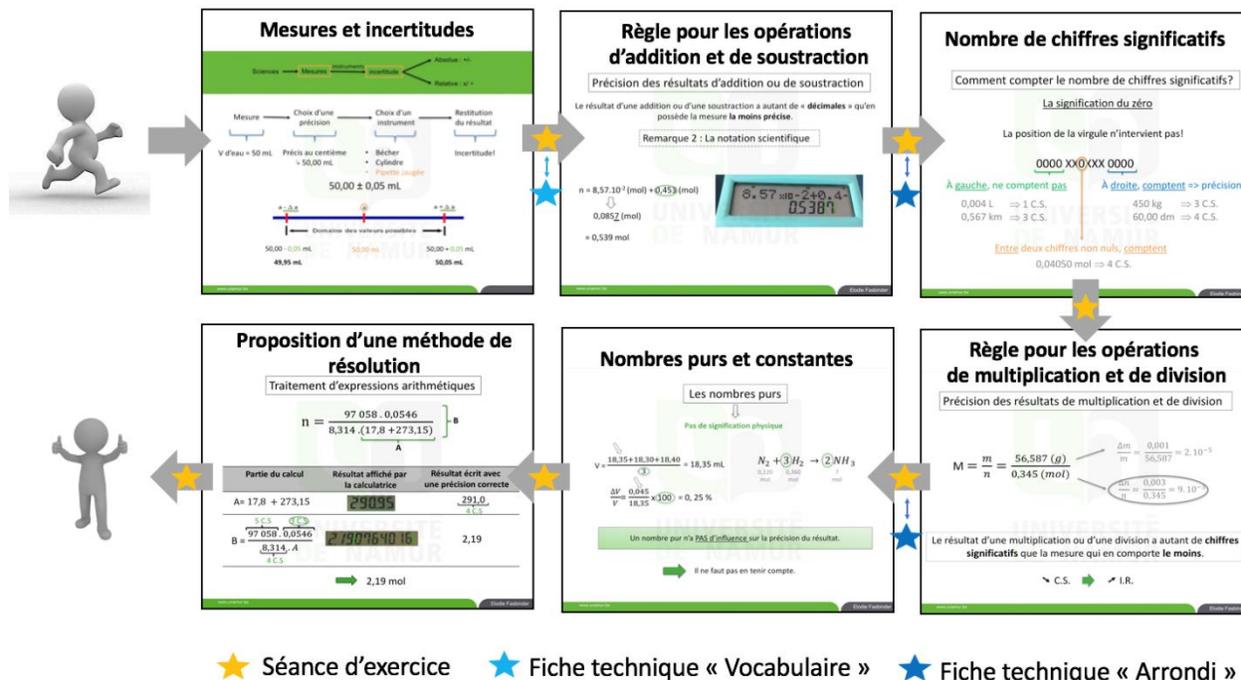


Figure 6 : Séquence de cours

Questions de recherche

Les questions de recherche concernent cette séquence de cours :

- 1) La séquence de cours rend-elle bien compte des différents objectifs didactiques et pédagogiques, selon l'avis d'encadrants impliqués dans l'enseignement de ce sujet ? Les attentes présupposées du parcours sont-elles remplies ?
- 2) La séquence de cours créée a-t-elle un impact sur les erreurs commises lors de l'application des règles permettant de transcrire des résultats expérimentaux avec une précision adéquate ?

Méthodologie

Les vidéos ont été une première fois visualisées, entre octobre et novembre 2017, par 22 personnes impliquées dans l'encadrement d'étudiants de l'enseignement supérieur et enseignant les règles permettant de restituer un résultat avec une précision adéquate, afin de collecter leurs avis et remarques. Parmi ces participants, il y a deux chargés de cours en chimie, treize doctorants en chimie, deux encadrants en physique dans le domaine universitaire et sept encadrants dans des domaines scientifiques travaillant dans une haute école. Leurs opinions ont été récoltées par écrit. Les participants ont exprimé leurs avis en complétant des items selon une échelle de Likert comprenant 4 choix (Pas du tout d'accord – Pas d'accord – D'accord –

Tout à fait d'accord) et se rapportant à chaque objectif poursuivi dans les vidéos. A aucun moment ils n'ont eu accès aux résultats de l'analyse a priori. Au travers du questionnaire, nous avons recueilli leur avis d'encadrant, leur ressenti quant à la démarche employée dans les vidéos pour présenter les concepts et notions. Le tableau 1 ci-dessous reprend les objectifs sur lesquels ils ont dû se positionner.

N° de la vidéo	Objectifs poursuivis
1	Établir clairement le lien entre la notion de mesure et d'incertitude Clarifier la façon de procéder à une lecture correcte d'un appareil de mesure Expliquer clairement la procédure pour restituer des résultats de mesure de manière adéquate
2	Montrer l'importance de restituer un résultat avec la précision adéquate Rendre compte du fait qu'il faut rester critique vis-à-vis du résultat affiché par la calculatrice Expliciter le lien entre la notion d'incertitude absolue et la règle à appliquer. Donner du sens à la règle Clarifier la façon d'appliquer la règle dans des calculs comprenant des valeurs en notation scientifique
3	Donner du sens au chiffre « 0 » en fonction de sa position dans le nombre Rendre compte du fait que la notation scientifique ne comporte que les chiffres significatifs
4	Expliciter le lien entre la notion d'incertitude relative et la règle à appliquer. Donner du sens à la règle
5	Différencier nombre pur et constante Arrondir correctement une constante
6	Proposer une méthode de résolution concrète pour résoudre des calculs « complexes »

Tableau 1 : Objectifs poursuivis par chacune des vidéos de la séquence de cours

Les encadrants ont aussi eu l'occasion, pour chacune des vidéos, d'exprimer librement leur avis en rédigeant des commentaires éventuels. L'analyse des réponses a permis d'apporter de légères modifications et de valider, du point de vue des encadrants, la séquence de cours.

Le public cible est composé d'étudiants inscrits en première année d'études en sciences pharmaceutiques et biomédicales. En septembre 2018, la séquence a été proposée à 317 étudiants via une plateforme de cours sur Moodle. Dans le courant du mois de mars, le même test que celui qui a été réalisé en 2017 a été effectué par environ 280 étudiants, suite à la mise en place du parcours. 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 quatre vidéos avec les exercices associés) et ceux qui ne l'ont pas fait.

Quelle que soit l'année scolaire, l'analyse des tests s'est faite en listant les erreurs effectuées en fonction de l'opération mathématique réalisée. Les erreurs sont ensuite replacées dans les catégories de difficultés recensées lors des analyses préalables et a priori.

Résultats

Test auprès des encadrants

Quelle que soit la vidéo, les objectifs sont généralement atteints d'après les encadrants. Seuls les avis négatifs sont discutés dans la suite de cet écrit ainsi que les changements envisagés.

Le tableau 2 présente le nombre d'encadrants s'étant positionnés sur les différents objectifs poursuivis dans la première vidéo.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
Établir clairement le lien entre la notion de mesure et d'incertitude			
0	0	9	13
Clarifier la façon de procéder à une lecture correcte d'un appareil de mesure			
0	1	6	15
Expliquer clairement la procédure pour restituer des résultats de mesure de manière adéquate			
0	0	3	13

Tableau 2 : Évaluation de la première vidéo par les encadrants (Fin octobre – Début novembre 2017)

Pour la première vidéo, l'un des encadrant n'était pas d'accord sur le fait que la vidéo permettait de clarifier la manière de lire une mesure donnée par un appareil.

Dans cette première vidéo, dans le cadre d'une illustration, deux cylindres gradués possédant les mêmes graduations sont présentés. L'un des deux cylindres ne possède aucune indication d'incertitude tandis que l'autre a une incertitude de 0,5 mL (Figure 7).

Lecture des appareils de mesure



Figure 7 : Lecture du volume sur deux cylindres gradués dans la première vidéo

Il est expliqué dans la vidéo que la lecture 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. Le cylindre d'incertitude 0,5 millilitre est, quant à lui, précis au dixième. L'encadrant aurait fait la même lecture pour les deux cylindres car il considère que deux appareils présentant les mêmes graduations sur des mesures identiques donnent des valeurs identiques. Cette personne a fait une transposition didactique. Il est en effet très rare que deux appareils prenant le même type de mesure n'aient pas la même précision. Elle a donc fait un raccourci qui, dans l'utilisation qu'elle a des appareils de mesure, ne pose pas de problème.

Il est cependant 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 (utilisée dans les vidéos) ;

- l'incertitude est la moitié de l'écart entre deux graduations successives.

Il est donc aussi possible que cet encadrant emploie cette seconde règle.

Le tableau 3 présente le nombre d'encadrants s'étant positionnés sur les différents objectifs poursuivis dans la deuxième vidéo.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
Montrer l'importance de restituer un résultat avec la précision adéquate			
0	3	8	11
Rendre compte du fait qu'il faut rester critique vis-à-vis du résultat affiché par la calculatrice			
0	1	6	15
Expliciter le lien entre la notion d'incertitude absolue et la règle à appliquer. Donner du sens à la règle			
0	1	9	12
Clarifier la façon d'appliquer la règle dans des calculs comprenant des valeurs en notation scientifique			
0	0	6	16

Tableau 3 : Évaluation de la deuxième vidéo par les encadrants (Fin octobre – Début novembre 2017)

Dans cette seconde vidéo, trois personnes trouvent que l'objectif « Montrer l'importance de restituer un résultat avec la précision adéquate » n'est pas atteint. Pour eux-mêmes, les encadrants comprennent que la vidéo a pour but de montrer que l'écriture d'un résultat avec une précision adéquate est importante. Ils se posent cependant des questions sur ce qu'en pensera un étudiant. Pour eux, la partie de la vidéo traitant de cet objectif risque d'être perçue, par les étudiants, comme un savoir mort. Seul un changement au niveau du discours est envisagé. La précision des résultats est mentionnée de manière systématique au travers des différents exemples traités dans l'espoir que les étudiants prennent conscience de l'importance de reporter les valeurs expérimentales avec une précision adéquate. Lors de la transformation des vidéos pour répondre aux attentes des encadrants, l'accent a été mis sur la notion d'incertitude et son lien avec la précision des mesures.

Sur le deuxième objectif, l'un des encadrant s'est demandé pour quelle raison le résultat affiché par la calculatrice est montré à chaque opération effectuée. Les encadrants ne sont pas au courant des résultats des tests et des entretiens d'explicitation menés avec les étudiants. Certains d'entre eux ne savent donc pas que l'un des facteurs d'erreur est justement la valeur affichée par la calculatrice, notamment lorsque cette dernière ne comporte pas un grand nombre de chiffres et/ou de décimales.

En ce qui concerne le troisième objectif, l'un des encadrants questionnés trouve que l'explication du sens de la règle n'est pas suffisamment claire. Sa remarque provient d'un problème de définition des termes employés. Pour lui, la précision ne peut être mise en lien qu'avec l'incertitude relative et pas avec l'incertitude absolue car les valeurs peuvent présenter des unités différentes. Au début de cette vidéo, un lien est effectivement fait entre la précision et l'incertitude sans stipuler le type d'incertitude (Figure 8). L'encadrant a probablement pensé que nous parlions de l'incertitude absolue.

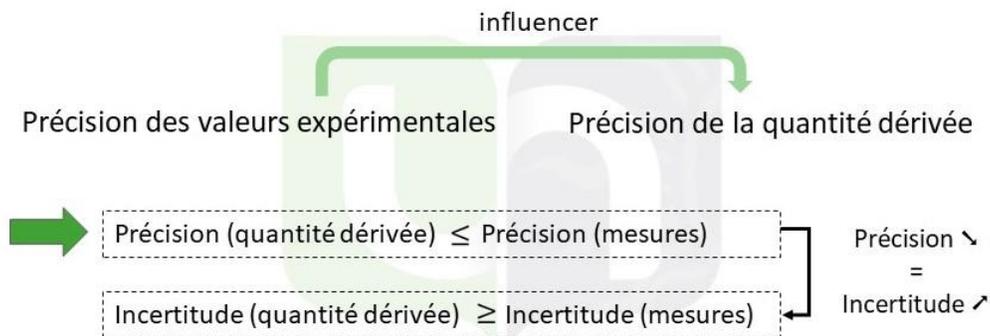


Figure 8 : Lien entre incertitude et précision dans la deuxième vidéo

Il ajoute ensuite que, dans le cadre d'une opération d'addition et/ou de soustraction, l'incertitude absolue du résultat doit être recalculée en utilisant des règles. Il ne mentionne pas ces dernières. En effet, dans le cadre de la vidéo, il est expliqué que le résultat doit avoir la même précision que la valeur possédant l'incertitude absolue la plus importante. Il est vrai que, normalement, il aurait fallu calculer l'incertitude absolue sur le résultat en tenant compte des incertitudes absolues des autres valeurs du calcul. Cependant, la règle à appliquer ne mentionne qu'une seule valeur, la moins précise c'est-à-dire celle qui possède l'incertitude absolue la plus importante. Le choix a donc été fait de ne pas recalculer l'incertitude absolue du résultat pour éviter un supplément d'informations n'ayant pas d'impact dans le cas présenté.

Le résultat d'une addition ou d'une soustraction a autant de « **décimales** » qu'en possède la mesure la **moins précise**.

$$T(K) = 17,8 \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$$

= 291,0 K

$\Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T = 0,01$



Figure 9 : Lien entre la règle à appliquer lors d'opérations d'addition et de soustraction et l'incertitude absolue dans la deuxième vidéo

Cet encadrant a une certaine expérience dans le domaine. Il a l'habitude d'utiliser toutes ces notions qui apparaissent comme n'étant pas évidentes en début d'apprentissage.

Cette difficulté à montrer le lien entre la règle à appliquer pour reporter un résultat avec une précision adéquate et l'incertitude est plus apparente dans la quatrième vidéo comme le montre le tableau 4. Cette vidéo traite de la règle à appliquer lors d'opérations de multiplication et de division.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
Expliciter le lien entre la notion d'incertitude relative et la règle à appliquer. Donner du sens à la règle			
0	6	7	9

Tableau 4 : Évaluation de la quatrième vidéo par les encadrants (Fin octobre – Début novembre 2017)

Six encadrants indiquent que l'objectif n'est pas atteint. Dans cette vidéo, il est dit et montré que c'est la valeur qui comporte le moins de chiffres significatifs qui possède l'incertitude relative la plus élevée sans

montrer qu'une diminution du nombre de chiffres significatifs engendre systématiquement une augmentation de l'incertitude relative (Figure 10).

$$M = \frac{m}{n} = \frac{56,587 \text{ (g)}}{0,345 \text{ (mol)}}$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,001}{56,587} = 2 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{0,003}{0,345} = 9 \cdot 10^{-3}$$

Le résultat d'une multiplication ou d'une division a autant de **chiffres significatifs** que la mesure qui en comporte **le moins**.

↘ C.S. ➡ ↗ I.R.

Figure 10 : Lien entre l'incertitude relative des facteurs et la règle à appliquer dans la quatrième vidéo

De nouveau, une remarque de fond à l'image de celle qui a été faite pour la deuxième vidéo est faite. Normalement, il faudrait recalculer l'incertitude relative sur le résultat à partir des incertitudes relatives de chacune des valeurs du calcul. Là aussi, il deviendrait alors difficile de faire le lien avec la règle à appliquer puisque cette dernière ne fait mention que de la valeur comportant le moins de chiffres significatifs.

Enfin, la plupart des encadrants trouvent que le lien n'est pas suffisamment mis en évidence. Dans la nouvelle version de la vidéo, nous montrons que lorsque le nombre de chiffres significatifs diminue suite à une diminution de la valeur elle-même ou de la précision de cette dernière, l'incertitude relative augmente et donc la précision diminue, comme illustré dans la figure 11.

$$M = \frac{m}{n} = \frac{98,587 \text{ (g)}}{1,346 \text{ (mol)}} \quad \frac{\Delta n}{n} = \frac{0,003}{1,346} = 2 \cdot 10^{-3}$$

↘ C.S. ➡ ↗ Δa

$$M = \frac{m}{n} = \frac{98,587 \text{ (g)}}{1,35 \text{ (mol)}} \quad \frac{\Delta n}{n} = \frac{0,01}{1,35} = 7 \cdot 10^{-3} \quad \text{↗ I.R.}$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{98,587 \text{ (g)}}{0,346 \text{ (mol)}} \quad \text{↘ a}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{0,003}{0,346} = 8 \cdot 10^{-3} \quad \text{↗ I.R.}$$

Figure 11 : Lien entre l'incertitude relative des facteurs et la règle à appliquer

Le tableau 5 présente le nombre d'encadrants s'étant positionnés sur les différents objectifs poursuivis dans la cinquième vidéo.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
Différencier nombre pur et constante			
0	0	10	12
Arrondir correctement une constante			
1	0	8	13

Tableau 5 : Évaluation de la cinquième vidéo par les encadrants (Fin octobre – Début novembre 2017)

Sur la seconde affirmation, un seul encadrant n'est pas du tout d'accord. Pour lui, il n'est tout simplement pas nécessaire d'arrondir les constantes. Selon cet encadrant, les constantes physiques sont généralement présentées avec trois chiffres significatifs ou plus. Il fait appel à son vécu en situation professionnelle. Il n'est apparemment que rarement confronté à des constantes présentant un grand nombre de chiffres ou n'est pas conscient que les valeurs employées sont arrondies.

En ce qui concerne les troisième et sixième vidéos, aucun désaccord n'est apparu. Les objectifs poursuivis sont atteints, selon l'avis des encadrants.

Test auprès des étudiants

Pour tester l'impact du parcours, le test effectué par les étudiants de 2016-2017 a été également réalisé par les étudiants de 2018-2019. Seuls 87 étudiants sur les 280 ont participé au cours en ligne. Sur le graphique est reporté le pourcentage d'étudiants en fonction de la cohorte et de l'erreur commise quelle que soit l'opération mathématique. Il n'est pas fait mention du dernier type d'erreur car elle n'est commise que par un petit nombre d'étudiants. Le pourcentage d'étudiants ayant suivi le cours est moins important pour chaque catégorie d'erreur.

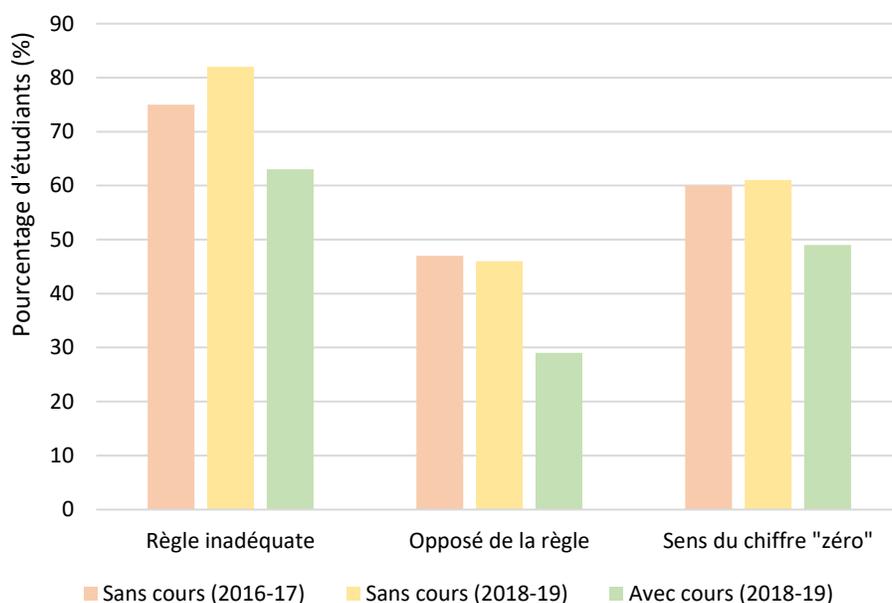


Figure 12 : pourcentage d'étudiants en fonction du type d'erreur commise

Pour s'assurer de l'impact du cours en ligne sur les types d'erreur commises, un test d'indépendance du khi-carré a été réalisé. L'hypothèse nulle est la suivante : le cours en ligne n'a pas d'impact sur les erreurs commises par les étudiants. La p-valeur correspondant à l'impact du cours sur les erreurs commises par les étudiants des différentes cohortes sur l'ensemble des opérations du test est de 0,90. 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.

Conclusion

Les étudiants débutant des études supérieures dans un domaine scientifiques éprouvent des difficultés à reporter des résultats expérimentaux avec la précision adéquate. Pour pallier à cela, un cours en ligne composé de six vidéos, d'exercices et de deux fiches techniques a été réalisé sur base des erreurs commises et d'hypothèses pouvant les expliquer. Cette séquence de cours a été testée auprès d'encadrants avant d'être proposée aux étudiants.

La plupart du temps, les encadrants considèrent que les objectifs poursuivis par les vidéos sont atteints. Quand ce n'est pas le cas, des remarques ont été énoncées. Il s'avère que les encadrants ont des habitudes liées à leur enseignement (transposition didactique) ou leur expertise ou se font une idée de ce que connaissent ou pas les étudiants. Sur base des résultats obtenus lors des analyses préalables et des analyses a priori, seules certaines de ces remarques ont engendré des changements.

De manière générale, cette séquence de cours en ligne semble avoir un impact positif sur le pourcentage d'étudiants commettant des erreurs lors du report de résultats avec la précision adéquate. Des tests statistiques révèlent cependant que ce résultat ne peut pas n'être attribué qu'au cours en ligne. D'autres éléments tels que l'encadrant, la motivation de l'étudiant, ... doivent probablement également être pris en compte. De plus, il est à noter que le test est réalisé cinq mois après la mise à disposition du cours pour les étudiants. L'impact du cours en est amoindri.

Références

- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, 9(3), 291–308
- Clase, H. J. (1993). More on the question of significant figures. *Journal of Chemical Education*, 70(2), 133. <https://doi.org/10.1021/ed070p133>
- 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>
- Giuseppin, M. (1996). Place et rôle des activités expérimentales en sciences physiques. *Didaskalia*, 9, 107–118.
- 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
- 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>
- 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>
- Satek, L. C. (1977). Calculators and significant figures. *Journal of Chemical Education*, 54(3), 177. <https://doi.org/10.1021/ed054p177>
- Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, J. F. (1997). *Chimie analytique*. Bruxelles: De Boeck Université
- Treptow, R. S. (1980). Significant figures : removing the zero mystique. *Journal of Chemical Education*, 57(9), 646. <https://doi.org/10.1021/ed057p646>
- 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>