

Faculté des sciences

Comprendre la physique nucléaire à différents niveaux d'éducation : recherche des invariants opératoires

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade académique de
Master [120] en sciences physiques, finalité didactique

Auteure : Elsa Tartinville

Promoteur : Prof. Gabriel Dias de Carvalho Jr

Lecteurs : Prof. Michel Crucifix

Prof. Eduardo Cortina Gil

Année académique 2024-2025

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon promoteur, le Professeur Gabriel Dias de Carvalho Jr, qui m'a énormément appris. Il y a deux ans, la didactique m'était encore inconnue et la Théorie des Champs Conceptuels, un mystère. Pas à pas, tu m'as fait découvrir cette branche de la physique, moins reproductible mais tellement plus humaine. Merci pour ta bienveillance et ta patience à toute épreuve. Merci de m'avoir fait confiance et de continuer à m'offrir ces opportunités extraordinaires.

Je remercie également les Professeurs Michel Crucifix et Eduardo Cortina Gil d'avoir accepté d'être lecteurs de ce mémoire. Même si cela sort de vos spécialités, j'espère que vous trouverez cela intéressant.

Je remercie aussi toutes les personnes qui ont pris le temps de répondre au questionnaire et grâce à qui j'ai pu réaliser ce mémoire. Merci aux 21 étudiant.e.s en bachelier, aux 10 étudiant.e.s en AESI et à mes 25 collègues en master ou à l'agrégation. Par confidentialité je ne les citerai pas, mais elles/ils m'ont été d'une grande aide.

Je tiens finalement à remercier ma famille de cœur et de sang.

Merci à ma compagne Jumpy

Pour tout l'amour, le soutien et la patience aussi

Dont elle fait preuve depuis plus de 3 ans.

Merci à mes parents

De m'avoir transmis leur curiosité pour les sciences

Et de m'avoir soutenue ces 5 années durant,

Au Cyclotron, mon lieu de naissance.

Merci aux ami.e.s que j'ai rencontré

Durant toute cette aventure compliquée.

Vous avez été d'une aide inégalée

Pour l'obtention de ce, si convoité, bout de papier.

Table des matières

Remerciements	3
Chapitre 1 Introduction	7
1.1. Parcours et motivations personnelles.....	7
1.2. Problématique et motivation de la recherche	8
1.3. Objectifs	10
1.4. Hypothèses	11
Chapitre 2 Revue de littérature.....	13
2.1. Culture scientifique	13
2.2. Danger des radiations	14
2.3. Interaction avec la matière	15
2.4. Temps de demi-vie	16
2.5. Types de radiation	17
2.6. Confusions lexicales	19
2.7. Préconceptions dans d'autres sciences	21
Chapitre 3 Méthodologie	23
3.1. Conceptions erronées	23
3.2. Construction du questionnaire	24
3.3. Répondant.e.s	25
3.4. Analyse des résultats.....	26
Chapitre 4 Cadre théorique.....	29
4.1. Processus d'apprentissage	29
4.2. Théorie des Champs Conceptuels	31
Chapitre 5 Analyse des résultats	37
5.1. La radioactivité comme un processus dangereux.....	37
5.2. La radioactivité comme un processus artificiel/naturel	41
5.3. La demi-vie	45
5.4. Les rayonnements radioactifs	49
5.5. La production d'énergie	55
5.6. La fission/fusion nucléaire.....	62
5.7. Conclusion des analyses	67
Chapitre 6 Conclusions et perspectives	71

Annexe I Analyse de manuels scolaires.....	73
I.I. Introduction.....	73
I.II. Révision de la littérature	74
I.III. Méthodologie	78
I.IV. Transposition didactique	79
I.V. Résultats des analyses.....	80
I.VI. Conclusion	86
Annexe II Questionnaire vierge	89
Annexe III QR code vers les données	95
Bibliographie	97

Chapitre 1

Introduction

Dans cette recherche, nous mettons en évidence la présence de conceptions erronées en physique nucléaire dans le raisonnement des étudiant.e.s et nous analysons l'impact de l'éducation sur ces préconceptions. Pour cela, nous avons réalisé un questionnaire à destination d'étudiant.e.s en 1^{re} année de bachelier, en dernière année de master physique et de l'agrégation de l'enseignement secondaire inférieur et supérieur. Nous allons démontrer la persistance de certaines conceptions alternatives quelques soit le niveau d'étude mais une évolution significative de la compréhension et de l'utilisation des concepts en lien avec la physique nucléaire en fonction du parcours scolaire. Nous allons également conclure à un manque de formation conceptuelle pour les futur.e.s enseignant.e.s du degré inférieur et supérieur.

Dans cette recherche, nous décrirons les motivations didactiques et sociétales à l'apprentissage de la physique nucléaire en secondaire, la méthodologie et la Théorie des Champs Conceptuels, le cadre théorique utilisé pour cette recherche, et nous présenterons les résultats obtenus ainsi que quelques recommandations pour appuyer la formation des futur.e.s enseignant.e.s. Nous terminerons, en annexe, par une rapide analyse des manuels scolaires à disposition des enseignant.e.s.

1.1. Parcours et motivations personnelles

Le but de ce mémoire est de mettre en évidence l'influence de la scolarité sur les préconceptions en lien avec la physique nucléaire. Je trouve que la compréhension des phénomènes nucléaires est d'une importance capitale dans notre société actuelle. En effet, la production énergétique, la gestion des déchets ou encore la médecine nucléaire sont des sujets qui reviennent souvent au centre de nos politiques européennes. Dans un système démocratique, il est donc essentiel de permettre à tout un chacun.e de participer au débat et donc, d'en comprendre les enjeux. Dans ce mémoire, nous nous questionnons donc sur les connaissances qui sont apportées sur ce sujet aux adolescent.e.s du secondaire en Belgique francophone.

Je suis une étudiante en fin de master en sciences physique à finalité didactique. Etant bercée dans le monde de l'éducation et des sciences depuis toujours, il m'a semblé évident de combiner les deux dans un projet qui, d'après moi, fait sens aujourd'hui. Entre une conscience climatique grandissante et une mésinformation de plus en plus importante, je pense que

l'éducation des sciences a un rôle important à jouer afin d'apporter aux adolescent.e.s des réponses claires pour qu'elles/ils fassent des choix éclairés à l'avenir. Personnellement, j'ai souvent été interpellée par l'incompréhension globale que certaines personnes pouvaient avoir sur le nucléaire. Selon moi, sans une compréhension scientifique de base suffisamment stable, ces citoyen.ne.s ne peuvent pas comprendre pleinement les enjeux que soulèvent ces questions ni leurs implications. Pour beaucoup, cela s'explique simplement par l'absence de connaissance à ce sujet. Pourtant, toute personne ayant obtenu son CESS en enseignement de transition (diplôme certifiant la réussite de l'enseignement secondaire) devraient, théoriquement, avoir vu cette matière en cours de sciences, et ce, quel que soit l'option choisie. Il est donc intéressant de se questionner sur l'existence d'un tel décalage entre ce qui est au programme et ce qui est connu par le grand public ayant pourtant suivi des cours de sciences. Pour cela, nous questionnerons principalement deux axes. D'une part, nous analyserons la persistance de certaines erreurs conceptuelles dans le domaine du nucléaire. D'autre part, nous interrogerons la formation des enseignant.e.s. En effet, pour avoir une éducation de qualité sur le nucléaire, il est essentiel d'avoir des enseignant.e.s bien formé.e.s et informé.e.s des enjeux liés à cette thématique.

Comme dit précédemment, le nucléaire est un sujet récurrent en politique et les étudiant.e.s de dernière année du secondaire, année de l'apprentissage de la physique nucléaire en accord avec le référentiel, seront amené.e.s à voter dans les années à venir. Il est donc essentiel de leur donner les clefs pour que ces futur.e.s citoyen.ne.s puissent agir sur le monde en connaissance de cause. De plus, énormément de mésinformations et/ou d'erreurs conceptuelles surgissent, selon moi, du domaine culturel et médiatique. Le sujet de la physique nucléaire est un thème récurrent dans notre quotidien que ce soit dans les films, les séries ou encore les journaux. Il est donc essentiel d'éduquer les élèves sur ce sujet afin qu'elle/ils puissent développer un esprit critique.

1.2. Problématique et motivation de la recherche

Nous inscrivons notre recherche, appartenant au domaine de la didactique de la physique, dans la continuité d'une tradition didactique de mise en évidence des préconceptions. En effet, une grande partie de la recherche en didactique des sciences consiste à mettre en évidence les conceptions erronées présentes dans les raisonnements des élèves et des enseignant.e.s. Nous allons utiliser la littérature pour construire notre questionnaire permettant de comprendre l'implication de chaque répondant.e.s dans telle ou telle préconception. Nous avons donc pour objectif d'évaluer l'engagement des étudiant.e.s dans certaines conceptions alternatives. Notre thématique est ainsi l'étude de l'impact du niveau d'éducation sur les préconceptions en physique nucléaire. Dans ce travail, nous tenterons de répondre à plusieurs questions telles que "Est-ce qu'une meilleure compréhension et

connaissance théorique des phénomènes physiques permettrait de limiter la présence de conception erronées dans les raisonnements lors d'une nouvelle situation-problème ?" ou "La formation des futur.e.s enseignant.e.s est-elle suffisante afin de prévenir l'apparition de ces préconceptions dans leur raisonnement ?".

La motivation de ce travail de recherche, déjà en partie expliquée précédemment, est la nécessité d'offrir à tout.e.s les élèves sortant du secondaire une connaissance minimale, mais suffisante, leur permettant de participer à notre démocratie de façon éclairée. Le référentiel en sciences va dans ce sens, en préconisant que les élèves puissent agir et comprendre le monde comme un.e scientifique. De plus, nous pouvons estimer que, selon les objectifs de l'enseignement des sciences du troisième degré, tout.e.s les étudiant.e.s sortant d'un enseignement de transition ont acquis les connaissances nécessaires pour être des citoyen.ne.s informé.e.s et conscient.e.s des enjeux globaux de notre société. Le but de l'enseignement secondaire est d'apporter un socle de connaissances communes à tout.e.s les élèves. L'enseignement permet, en plus de partager des valeurs communes, d'apporter un savoir de base commun et ce, afin de nourrir le débat démocratique. C'est probablement pour cette raison que la physique nucléaire fait partie du programme des sciences de base (3 périodes de sciences par semaine), malgré le fait que la plupart des élèves ne suivront pas un cursus scientifique par la suite. Il est donc essentiel que cet enseignement soit de qualité car il servira de socle pour permettre aux élèves de prendre une place active dans la société. Dans ce cadre, les enseignant.e.s ont une place centrale. En effet, elles/ils doivent être capables, à la fois d'identifier les conceptions alternatives des élèves et de produire des activités et des contenus didactiques permettant d'y remédier, tout en étant conscient.e.s de leurs propres préconceptions. Il est donc essentiel que la formation des futur.e.s enseignant.e.s leur permette d'acquérir les outils didactiques ainsi que les connaissances conceptuelles nécessaires et suffisantes pour faire face à ces nombreux défis.

Les citoyen.ne.s de demain sont celles/ceux que nous formons actuellement. Il est donc dans l'intérêt de tout.e.s de donner le plus de clefs possibles aux élèves afin de leur permettre de mettre en application leur connaissance lors de nouvelles situations, de réaliser des raisonnements complexes et inférentiels et d'éveiller leur esprit critique. Nous avons comme volonté de voir si les enseignements reçus par les élèves à la fin du secondaire sont suffisants pour leur permettre d'agir sur le monde comme des scientifiques et si la formation reçue par les futur.e.s enseignant.e.s est suffisante pour leur permettre d'aider et d'accompagner au mieux les élèves lors de leur apprentissage. L'enseignement fait partie des piliers centraux pour tendre vers une société plus éclairée et critique. Ainsi, la première étape est, selon nous, l'éducation des élèves et la formation des professeur.e.s. Notre recherche a donc l'ambition de vouloir, en quelque sorte, pointer le décalage entre la volonté du référentiel disant que les élèves doivent être capables d'agir sur le monde comme des scientifiques, et leur maîtrise réelle des connaissances en physique nucléaire dans des cas concrets.

1.3. Objectifs

Ce mémoire, au-delà des problématiques évoquées jusque-là, a pour objectif principal de mesurer l'impact de l'éducation sur la compréhension et la présence de conceptions erronées lors de raisonnements en physique nucléaire. Pour cela, plusieurs buts sous-jacents ont été identifiés. Tout d'abord, nous avons comme premier objectif intermédiaire, la mise en évidence d'occurrence d'erreurs conceptuelles en lien avec les notions de temps de demi-vie, de production d'énergie ou encore de fission et fusion nucléaire. Le but est ici de mettre en lumière la présence de certains patterns dans le raisonnement des étudiant.e.s interrogé.e.s à l'aide des invariants opératoires, tels que décrit dans la Théorie des Champs Conceptuels par Vergnaud. Grâce à ce cadre théorique, nous pourrions inférer l'origine des raisonnements erronés et donc la préconception sous-jacente, l'erreur conceptuelle pouvant provenir de « concepts-en-acte » non pertinents ou de « théorèmes-en-acte » faux. Nous détaillerons ces éléments théoriques dans le chapitre dédié.

Ensuite, nous avons comme second objectif intermédiaire d'observer la présence ou l'absence d'une corrélation entre la maîtrise des concepts théoriques et la capacité d'un.e répondant.e.s à réaliser un raisonnement inférentiel dans le cas d'une nouvelle situation. Les concepts purement théoriques sont appelés de "niveau déclaratif" et les raisonnements inférentiels requérant une plus grande demande cognitive sont appelés de "niveau opératoire". En d'autres termes, nous analyserons donc la relation entre la compréhension d'un niveau déclaratif et celle d'un niveau opératoire. Cela permettra d'identifier s'il existe une différence notable entre les connaissances théoriques et les réflexions demandant un recul et un esprit critique sur ces notions. Cela aidera à déterminer si la maîtrise des concepts théoriques est essentielle pour la réalisation d'inférences ou si, au contraire, une maîtrise partielle de ces notions est suffisante pour porter un regard éclairé et situé lors de nouvelles situations. Nous tenterons donc de savoir si une compréhension se situant uniquement sur le plan déclaratif, c'est-à-dire la compréhension et la récitation d'informations théoriques sans capacité d'abstraction, permet d'inférer sur des questions plus complexes et demandant un plus grand recul. Ce potentiel manque d'inférence empêcherait les élèves d'avoir les clefs, en tant que citoyen.ne.s, pour comprendre les enjeux et de prendre part au débat politique de manière éclairée.

Le dernier objectif de cette recherche est de voir si la formation initiale des enseignant.e.s est suffisante pour palier à tous les défis conceptuels et didactiques propres aux notions en lien avec la physique nucléaire. Derrière cette phrase se cache un énorme défi pour les formateur.rice.s qui doivent permettre aux étudiant.e.s de l'agrégation de comprendre suffisamment en profondeur la physique nucléaire, de comprendre leurs propres conceptions erronées, processus qui en lui-même est très long et demande un recul important sur ses propres raisonnements, et de mettre en place des outils didactiques permettant à leurs

futur.e.s élèves de se détacher à leur tour de leurs conceptions alternatives. Nous avons donc comme objectif d'observer si la formation des futur.e.s enseignant.e.s est satisfaisante et permet de mettre en défaut la majorité des préconceptions présentes dans les raisonnements des étudiant.e.s. Pour avoir une éducation de qualité à propos de la physique nucléaire pour les élèves du secondaire, tout part des futur.e.s enseignant.e.s et de leur formation. Si nous voulons répondre à tous les défis cités précédemment, c'est-à-dire donner les clefs aux élèves pour être des acteur.rice.s du monde de demain, il est important de mettre cette formation initiale au centre des préoccupations et donc de cette recherche.

Durant cette recherche, nous répondrons donc à cet objectif principal, à savoir questionner l'influence que possède le niveau d'éducation sur la capacité d'abstraction des étudiant.e.s, et aux 3 objectifs complémentaires : observer la récurrence dans l'utilisation des invariants opératoires dans les raisonnements des répondant.e.s, noter une potentielle corrélation entre la maîtrise déclarative et la capacité à faire des inférences et finalement, constater l'efficacité de la formation initiales des enseignant.e.s.

1.4. Hypothèses

Face à tous ces objectifs, plusieurs hypothèses sont à développer. Tout d'abord, nous pourrions observer une amélioration des connaissances théoriques avec le niveau académique. Nous pouvons donc supposer que, comme les étudiant.e.s de l'agrégation de l'enseignement secondaire supérieur possèdent déjà un master, il s'agirait des répondant.e.s avec la meilleure connaissance théorique sur le sujet. Peut-être qu'une considération supplémentaire devra être apportée en fonction du background académique et professionnel de ces étudiant.e.s. Ensuite, les étudiant.e.s de master devrait également bien maîtriser les notions en lien avec la physique nucléaire au vu des nombreux cours suivis sur le sujet. À l'inverse, nous pouvons donc nous attendre à observer les moins bons résultats chez les répondant.e.s de 1^{re} année en bachelier en sciences physiques et mathématiques. En effet, il s'agit des seul.e.s étudiant.e.s qui n'ont eu aucun autre cours de physique nucléaire que celui dispensé en dernière année de secondaire.

Dans le même sens, nous pouvons faire l'hypothèse qu'une bonne compréhension des concepts théoriques est essentielle pour réaliser des inférences. Nous nous attendons donc à observer une corrélation entre le degré de maîtrise des notions de base et la véracité des raisonnements réalisés dans le cadre d'une nouvelle-situation problème. Nous pourrions donc observer des raisonnements plus riches et complets chez les étudiant.e.s ayant une bonne maîtrise des concepts théoriques, et donc, selon notre hypothèse précédente, principalement chez les répondant.e.s de master et à l'agrégation pour le secondaire supérieur. Cela signifierait qu'une bonne connaissance des notions de base est essentielle pour réaliser des inférences et donc, pour comprendre les enjeux sociaux et prendre part à notre système

démocratique. Si les résultats des étudiant.e.s en 1^{re} année de bachelier ne sont pas concluants, c'est-à-dire que ces répondant.e.s ne sont pas capables de construire des raisonnements argumentés et nuancés dans une nouvelle situation, cela voudrait dire que la formation reçue dans le secondaire n'est pas suffisante pour rendre les élèves citoyen.ne.s du monde de demain. Si à l'inverse, les étudiant.e.s réalisent des inférences dans leurs raisonnements, cela peut vouloir dire que les cours suivis en secondaire sont suffisants et permettent de leur donner les clefs pour se positionner face aux enjeux actuels, répondant ainsi aux attentes du référentiel. Une troisième possibilité serait que l'on observe bien un manque de connaissances au niveau théorique mais que cela n'empêche pas les étudiant.e.s lors de la résolution de problèmes et que ces dernier.ère.s arrivent tout de même à développer un raisonnement construit et logique. Cela pourrait signifier que les cours du secondaire leur ont donné la possibilité de développer des raisonnements opératoires utiles dans de nouvelles situations, mais sans être rentré dans les détails techniques et théoriques et que cela ne leur pose pas préjudice lors de la résolution de nouvelles situations-problèmes.

Ensuite, concernant la formation des enseignant.e.s, il serait intéressant de séparer les étudiant.e.s suivant l'agrégation en enseignement pour le secondaire inférieur et celles/ceux du secondaire supérieur. En effet, les parcours académiques et les attentes ne sont pas les mêmes pour ces deux cursus. D'un côté, les futur.e.s enseignant.e.s dans l'inférieur suivent un bachelier professionnalisant dans lequel se trouvent des cours de physique et de didactique. De l'autre, les futur.e.s enseignant.e.s dans le secondaire supérieur suivent une agrégation en 1 an après l'obtention d'un master disciplinaire. Dans ce cadre, elles/ils suivent un cours de didactique de la physique. Si la formation des futur.e.s enseignant.e.s est suffisante, nous devrions observer la quasi-inexistence de traces des préconceptions. En effet, il est essentiel qu'elles/ils soient conscient.e.s de ces conceptions erronées pour aller à leur rencontre et développer des outils didactiques afin d'aider les élèves à les contourner. A contrario, si nous décelons la présence de ces conceptions alternatives dans leurs raisonnements, cela signifie que la formation initiale des enseignant.e.s n'est pas suffisante et doit être modifiée pour prendre en compte ces lacunes, et ce, qu'il s'agisse d'étudiant.e.s à l'agrégation dans le secondaire inférieur ou supérieur.

Après toutes ces considérations, nous allons passer à la méthodologie et au cadre théorique utilisé. Nous aborderons finalement l'analyse des données et les résultats de notre étude pour confirmer ou infirmer nos hypothèses.

Chapitre 2

Revue de littérature

Dans ce chapitre, nous présentons les recherches en didactique déjà réalisées dans le domaine de la physique nucléaire. Pour cette revue de littérature, nous nous sommes concentrés sur une vingtaine d'articles publiés entre 1990 et 2021 et nous tenterons ici d'en extraire les principales conceptions erronées concernant la physique nucléaire. Il est intéressant de noter que ces études déplorent une faible littérature à propos de ces préconceptions. En effet, à l'inverse d'autres thématiques telles que la mécanique ou l'électricité, la physique nucléaire est rarement au centre des recherches en didactique. Cela peut s'expliquer par la faible représentation de cette thématique dans les programmes scolaires, et ce, dans l'entièreté des pays couverts par ces recherches. Il est utile de souligner l'utilisation d'une intelligence artificielle lors de l'analyse de certains articles, celle-ci n'ayant pas servi lors de la rédaction mais uniquement lors de leur lecture.

2.1. Culture scientifique

Comme nous l'avons motivé lors de l'introduction, l'enseignement de la physique nucléaire est essentiel pour permettre aux étudiant.e.s de comprendre et d'agir sur le monde. Les recherches mentionnées tout au long de ce chapitre vont également dans ce sens en mettant en avant le concept de « culture scientifique ». Celui-ci est défini par le programme international PISA (Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves) de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), comme étant « la capacité des individus de s'engager dans des questions et des idées en rapport avec la science en tant que citoyens réfléchis » (OCDE, 2016).

Les individus cultivés sur le plan scientifique sont prêts à s'engager dans des raisonnements sensés à propos de la science et de la technologie, et doivent pour ce faire utiliser les compétences suivantes :

- Expliquer des phénomènes de manière scientifique : reconnaître, proposer et évaluer des thèses expliquant une série de phénomènes naturels et technologiques.
- Évaluer et concevoir des recherches scientifiques : décrire et évaluer des études scientifiques, et proposer des moyens de répondre à des questions de manière scientifique.
- Interpréter des données et des faits de manière scientifique : analyser et évaluer des données, des thèses et des arguments présentés sous diverses formes, et en tirer des conclusions scientifiques appropriées.

(OCDE, 2016).

Afin de présenter les différentes conceptions alternatives, nous utiliserons la même structure que celle présentée dans l'article de Morales López A.I. et Tuzón Marco P. (2021). En ce sens, nous découperons les principales préconceptions en physique nucléaire en différentes catégories que nous avons regroupé en plusieurs sous-points et que nous détaillerons dans la suite. Finalement, nous présenterons d'autres conceptions erronées en lien avec la physique nucléaire mais qui appartiennent également à d'autres disciplines comme la chimie ou les mathématiques.

2.2. Danger des radiations

Tout d'abord, la première conception alternative observée consiste à dire que « la radiation s'accumule dans la matière ». Par exemple, une idée très répandue est celle disant que les aliments exposés aux rayonnements ionisants stockent ces radiations. De ce fait, manger ces aliments est dangereux pour l'être humain car les rayonnements vont, à leur tour, s'accumuler dans notre corps. Cela amène à des raisonnements tels que « l'irradiation des aliments produit des aliments radioactifs » ou « les radiations peuvent s'accumuler dans le corps humain » (Eijkelhof H. M. C. and all, 1990 ; Eijkelhof H.M.C., 1990). Certain.e.s élèves mentionnent non seulement le stockage des radiations dans un objet, mais aussi leur libération ultérieure par cet objet. Les radiations stockées dans certains légumes après l'accident de Tchernobyl auraient, par exemple, été libérées en les mangeant. Une analogie peut être faite pour expliquer la présence de radiations dans des objets et leur éventuelle libération par ces objets. On peut, en effet, voir cela comme le stockage d'eau dans une éponge et de sa libération par compression (Klaassen C. W. J. M. and all, 1990).

Ensuite, beaucoup d'élèves considèrent la radioactivité comme un processus nocif pour les êtres vivants. Cette préconception est une des plus étudiées à travers les différents travaux de recherches. De nombreuses études mettent en évidence la peur du nucléaire comme étant une conséquence de cette conception erronée. Certaines craintes sont légitimes, d'autres sont, à l'inverse, nourries par une toxicité supposée du nucléaire qui n'est pas justifiée du point de vue scientifique. Par exemple, selon Boyes E. et Stanisstreet M. (1994), Un tiers de leur répondant.e.s (des enfants entre 11 et 16 ans) pensaient que l'exposition à la radioactivité pouvait provoquer des arrêts cardiaques. D'après certain.e.s étudiant.e.s, il existe un seuil à partir duquel les radiations sont dangereuses pour le corps humain. Ce seuil définit la dose de rayonnement que le corps humain peut supporter sans dommage (Plotz T. et Hopf M., 2016). Une autre recherche réalisée par Acar Sesen B. et Ince E. (2010) a montré, en analysant 200 sites internet, qu'un grand nombre de préconceptions s'y retrouvaient. Les auteures ont, entre autre, observé la présence d'arguments en faveur du caractère nocif de la radiation dans 30% des sites analysés, et ce, quel que soit la quantité de rayonnement.

Dans la même idée, beaucoup considèrent que la radiation est grandement destructive et dangereuse. Une étude réalisée par Neumann S. et Hopf M. (2013) met en évidence les différents sentiments des élèves liés au nucléaire avant et après l'accident de Fukushima. Ils ont observé un pourcentage plus important d'étudiant.e.s faisant référence aux radiations avec des termes négatifs. Il est intéressant de noter que ces conclusions portent sur toutes les radiations, qu'elles soient radioactives ou électromagnétiques. Les auteurs ont démontré que la nocivité des radiations dépend principalement, non pas du type de radiation, mais du contexte dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, de nombreuses personnes jugeaient les radiations ionisantes inoffensives à des fins médicales, tandis qu'elles étaient jugées nocives pour l'irradiation des aliments. Selon leur recherche, pour la grande majorité des répondant.e.s, il était indiscutable que les rayonnements radioactifs sont dangereux. En effet, seul.e un.e élève a cité l'utilisation médicale du nucléaire. Les recherches de Plotz T. et Hollenthoner F. (2019) vont également dans ce sens, en montrant une augmentation de dessins en lien avec les radiations nucléaires lorsqu'il était demandé à des enfants de dessiner des radiations. De plus, la grande majorité de ces dessins avaient une connotation négative.

Alsop S. (2001) s'est intéressé à l'impact de la présence de radon dans l'environnement des élèves. Pour cela, il a interrogé deux groupes d'étudiant.e.s dont un des groupes était constitué d'élèves vivant dans une zone du Royaume-Uni ayant un taux élevé de radon dans le sol. D'un point de vue théorique, les deux groupes ne montrent pas de distinction dans leurs connaissances des concepts en lien avec la physique nucléaire. De même, l'analyse affective a donné des résultats comparables pour les deux groupes, ceux-ci exprimant une crainte et une méfiance envers la radioactivité. Cela suggère que vivre avec la radioactivité semble avoir peu d'influence sur les émotions négatives dirigées vers le nucléaire. On aurait pu raisonnablement supposer que vivre avec la radioactivité au quotidien réduirait le niveau d'anxiété ; cependant les données obtenues dans la recherche remettent en question cette hypothèse.

Cette peur du nucléaire peut s'expliquer par le traitement médiatique qui y est associé (Lijnse P.L. and all, 1990). En effet, on peut constater un lien direct entre les idées des élèves et les informations véhiculées par les médias. Un grand nombre de médias relaient le sentiment de peur et de risque associé au nucléaire. D'après les rapports de presse, on peut conclure que les radiations ionisantes sont considérées comme un mystère très dangereux.

2.3. Interaction avec la matière

Par la suite, nous allons porter notre attention sur une idée répandue « la radioactivité affecte différemment la matière vivante et inerte ». Selon l'étude de Morales López A.I. et Tuzón Marco P. (2021), la majorité des étudiant.e.s se préoccupent uniquement des effets de la radioactivité sur la matière vivante. Ceci conduit parfois à la conclusion erronée que la matière

inerte n'est pas altérée par la radioactivité. Les auteurs ont, par exemple, observé des réponses comme « la radioactivité modifie la composition des êtres humains et entraîne leur mort. En revanche, la matière inerte ne change pas de morphologie » ou « la radioactivité affecte davantage les êtres vivants, car elle réagit plus facilement avec la matière vivante qu'avec les objets inertes ».

En outre, une préconception circule sur l'idée qu'un objet ou un être vivant exposé à de la radiation devient, à son tour, radioactif. Cela peut se traduire par la pensée que cet objet devient une source de radiations ou possède des propriétés radioactives. Ce raisonnement est vrai dans certains cas, lorsque l'énergie transportée est suffisante pour exciter les noyaux atomiques et déclencher une réaction nucléaire. Mais ce n'est pas le cas dans la plupart des situations. Une étude a mis en évidence la présence de cette conception erronée sur plusieurs sites internet (Acar Sesen B. et Ince E., 2010). On y retrouve, en effet, des phrases comme « si un objet est exposé à un rayonnement ionisant, il devient radioactif ». Cela peut donc renforcer les conceptions alternatives des élèves et ne les aide donc pas dans leur apprentissage. Certain.e.s étudiant.e.s estiment, par ailleurs, que tous les objets émettent des rayonnements, car selon elles/eux, de nos jours, tout est contaminé par les radiations nucléaires. Dans ce cas, en plus de faire intervenir la préconception selon laquelle un objet exposé aux rayonnements devient radioactif, on peut observer aussi une indifférenciation des concepts « d'irradiation » et « de contamination ». Nous en parlerons davantage dans la suite.

2.4. Temps de demi-vie

Le temps de demi-vie est souvent un concept mal maîtrisé par les étudiant.e.s. Il en résulte une conception erronée disant que la radioactivité est conservée, au sens où, si un objet devient radioactif, il le reste pour toujours, sans prendre en compte les processus de désintégration ou de demi-vie. La plupart des difficultés de raisonnement des étudiant.e.s sur ces notions proviennent de leurs modèles mentaux inexacts concernant l'atome (Prather E., 2005). Soit les étudiant.e.s n'ont pas une compréhension claire du rôle du noyau atomique lors de processus radioactifs, soit elles / ils possèdent ces connaissances mais n'arrivent pas à les mobiliser lors d'une situation faisant référence à la radioactivité. Dans sa recherche, l'auteur va plus loin en identifiant deux préconceptions mettant en lumière la difficulté de compréhension de la décroissance radioactive.

D'une part, les élèves pensent que « les électrons orbitaux sont liés à l'état radioactif des atomes et au processus de désintégration ». D'autre part, les étudiant.e.s estiment que « la masse et le volume d'une substance radioactive diminuent au cours de la période de demi-vie ». Lors de son étude, Prather (2005) a observé que ces conceptions alternatives provenaient, entre autre, d'une mauvaise compréhension du concept d'instabilité. Les élèves pensent que cette dernière provient de la disposition ou du nombre de particules chargées

présentes dans l'atome. La désintégration radioactive est vue alors comme l'émission de la particule portant la charge excédentaire, rétablissant ainsi la stabilité de l'atome. D'autres étudiant.e.s comprennent la radioactivité comme l'excitation d'un électron et expliquant que la désintégration radioactive est l'émission d'un photon résultant du changement d'état énergétique de l'électron excité. Concernant la demi-vie, la taille, la masse et le volume d'un élément radioactif ne sont pas divisés par deux après ce temps, contrairement à ce que pensent certain.e.s élèves. En effet, la masse des radiations ionisantes est négligeable par rapport à la masse totale. Même si la moitié des atomes radioactifs se désintègrent durant une période de demi-vie, le nombre total d'atomes dans l'objet reste constant. Cette fausse croyance peut s'expliquer par le nom donné à ce concept, le mot « demi » faisant référence au fait qu'il faut diviser par 2.

Une autre préconception en lien avec les concepts de demi-vie et de décroissance radioactive est le fait de penser que la température peut modifier la vitesse de désintégration. 22 sites internet affirment que « le taux de désintégration de toute substance radioactive diminue à mesure que la température augmente » (Acar Sesen B. et Ince E., 2010). Ce n'est scientifiquement pas le cas et la vitesse de désintégration dépend uniquement de la nature du matériau. Aussi, une préconception assez répandue à travers les médias est le fait que le temps de demi-vie correspond au temps « d'activité » d'un élément radioactif, c'est-à-dire qu'après une demi-vie, le radioisotope n'est plus dangereux (Lijnse P.L. and all, 1990). En outre, Kohnle A., Mclean S. et Aliotta M. (2011) ont mis en évidence dans leur recherche que beaucoup d'étudiant.e.s utilisent un raisonnement suggérant la compréhension de la décroissance radioactive comme un processus linéaire et non exponentiel. Un certain nombre d'élèves confondent également le nombre de noyaux qui se sont désintégrés et le nombre de noyaux restants.

2.5. Types de radiation

Beaucoup d'étudiant.e.s pensent que la radioactivité est un processus uniquement artificiel. En effet, peu d'étudiant.e.s sont conscient.e.s de l'existence de sources naturelles de radioactivité. Certain.e.s citent le Soleil ou les roches comme sources naturelles, mais la majorité des élèves pensent tout de même que les rayonnements radioactifs proviennent exclusivement des centrales nucléaires (Boyes E. et Stanisstreet M., 1994). Toutefois, il est difficile de déterminer si les répondant.e.s considéraient ces radiations comme une conséquence d'accidents nucléaires ou comme un produit inévitable de la technologie de production d'énergie dans ces centrales, comme les déchets nucléaires. D'après Plotz T. et Hopf M. (2016), le fondement de la conception erronée « les radiations sont artificielles » est le lien entre les rayonnements et les inventions humaines. Comme les machines sont construites, elles sont artificielles, de sorte que les rayonnements utilisés ou générés dans ces

machines sont également artificiels. Et puisque, comme expliqué par la suite, tous les types de rayonnements sont considérés comme radioactifs (même les non ionisants), alors la radioactivité est artificielle.

Ensuite, une autre préconception ancrée dans le raisonnement d'énormément d'élèves est : « un atome ne peut pas changer sa nature ». Cela empêche la compréhension du phénomène de rayonnement car les élèves possédant cette conception erronée ne peuvent pas concevoir les radiations comme la libération de différentes particules dont des protons, des neutrons et des électrons (désintégrations alpha et beta). D'ailleurs, Kohnle A., Mclean S. et Aliotta M. (2011) et Rathore R. (2016) écrivent à ce sujet que, comme les étudiant.e.s voient le rayonnement beta comme l'émission d'un électron, cela renforce l'hypothèse d'une émission de l'électron depuis la couche électronique et non depuis le noyau.

Un bon nombre d'étudiant.e.s considèrent que la radioactivité est responsable de beaucoup de problèmes environnementaux tels que l'émission de CO₂, la pollution ou encore, le trou dans la couche d'ozone. Boyes E. et Stanisstreet M. (1994) ont, par exemple, montré que plus de la moitié des élèves pensent que la radioactivité peut exacerber l'effet de serre lié au changement climatique et / ou endommager la couche d'ozone. En plus de ces problèmes environnementaux, les élèves attribuent la responsabilité des pluies acides au nucléaire. Cela montre une grande confusion chez les étudiant.e.s quant aux causes de différents problèmes environnementaux. Ces interprétations approximatives peuvent émaner d'une confusion entre les notions de « contamination radioactive », de « saleté » et de « pollution » en général.

De plus, beaucoup d'élèves ne sont pas capables de distinguer les différents types de radiations et pensent donc qu'elles sont toutes dangereuses. Cela amène à des conceptions erronées telles que « tous les appareils électriques émettent des rayonnements nocifs ». Dans ce sens, on peut lire sur certains sites internet « Les rayonnements ionisants ne sont pas naturels et sont toujours nocifs. Il existe de nombreuses sources de rayonnements ionisants. Les téléphones portables, la radio, la télévision, les appareils électroniques et les rayons X utilisés dans les applications médicales sont les plus courants » (Acar Sesen B. et Ince E., 2010). Dans cet exemple, nous observons plusieurs erreurs conceptuelles. Tout d'abord, comme mentionné précédemment, les radiations ionisantes dont font partis les rayonnements radioactifs peuvent avoir comme origine une source naturelle et ne sont pas forcément nocifs. De plus, il est faux de dire que tous les rayonnements sont ionisants. Parmi ceux mentionnés, seuls les rayons X sont ionisants et ce sont donc les seuls qui peuvent être dangereux.

Dans la même idée, Morales López A.I. et Tuzón Marco P. (2021) rapportent dans leur étude qu'un nombre significative d'étudiant.e.s pense que tous les types de rayonnements, tels que les micro-ondes, le rayonnement solaire, les ultraviolets, les rayons X ou même le son, sont d'origine nucléaire. Cela expliquerait le fait que le téléphone portable, la télévision, le micro-

ondes ou encore les radiographies soient considérés comme dangereux, car leurs rayonnements sont, dans l'esprit des élèves, comparables à ceux des rayonnements nucléaires. Les rayons X sont même la deuxième application la plus fréquemment citée pour parler de la radioactivité, preuve que cette confusion est profondément ancrée dans le raisonnement des étudiant.e.s. Cela peut également s'expliquer par la proximité entre certaines applications médicales des rayons X et celles de la physique nucléaire.

2.6. Confusions lexicales

Une erreur récurrente chez les élèves est la confusion entre les différentes notions de « radioactivité », « radiation » et « matériau radioactif ». C'est ce qui est soulevé par Prather E. (2005) et ce dernier fait également le lien avec le concept « d'irradiation » ce qui amène à des raisonnements erronés tels que « les aliments irradiés peuvent contenir des restes de radiations », que nous avons abordé plus haut. Cela a aussi pour conséquence une mauvaise compréhension du phénomène de propagation. En effet, les élèves pensent souvent que la radioactivité se propage sous forme d'un « nuage de gaz ». Boyes E. et Stanisstreet M. (1994) suggèrent que les élèves confondent le mouvement des matières radioactives, c'est-à-dire les macroparticules radioactives transportées par le vent, telles que la « poussière », avec la propagation du rayonnement. D'après Millar R. (1994), de nombreux élèves ont une conception indifférenciée de la matière radioactive, associée à l'étiquette « radioactif ». Les résultats laissent entendre que les trois notions de « contenant des matières radioactives », « contenant des radiations » et « être radioactif » sont fortement associées dans l'esprit des élèves. Toutefois, l'étiquette « radioactif » n'est pas simplement synonyme de « contient des matières radioactives » (comme dans la vision scientifique) ou de « contient des radiations ». Les schémas de réponse de cette étude suggèrent que le terme « contient des radiations » peut être interprété par de nombreux élèves comme signifiant « ayant absorbé des radiations ».

Une autre étude met en évidence que dans le cas d'une menace directe (par exemple, l'accident de Tchernobyl), le terme « radiation » est dominant, tandis que le terme « radioactivité » est souvent utilisé dans des contextes plus diffus et moins clairs pour les élèves (par exemple, l'irradiation des aliments) (Lijnse P.L. and all, 1990). Toutefois, ce sont ces notions qui apportent avec elles une aura de danger dont il faut se protéger. Cette compréhension n'est pas tant régie par une attitude théorique mais plutôt par une attitude pragmatique. Il semble donc que, dans la pensée du monde réel, un seul concept indifférencié de « radiation » soit nécessaire pour se protéger d'un potentiel danger (Klaassen C. W. J. M. and all., 1990).

En outre, lié à cette indifférenciation des différents concepts mentionnés précédemment, beaucoup de recherches mettent en évidence une confusion entre les termes « irradiation »

et « contamination ». Cela induit une analogie courante comparant les radiations à un poison toxique qui peut contaminer les personnes et l'environnement (Lijnse P.L. and all, 1990). D'après cette même recherche, cette indistinction entre les concepts de « contamination » et « d'irradiation » peut s'expliquer par le fait que la plupart des élèves ne savent pas différencier les notions « d'activité », « de transport » et « d'absorption » des éléments radioactifs et n'ont donc aucune idée des processus qui se déroulent à la source ou au récepteur des radiations. Leurs connaissances sur les processus radioactifs se limitent principalement à l'idée vague que « quelque chose de dangereux est libéré, susceptible de nous atteindre et de provoquer des cancers et autres problèmes ». Morales López A.I. et Tuzón Marco P. (2021) vont plus en profondeur en mettant en avant une analogie récurrente faite entre la radioactivité et la maladie microbienne. En effet, l'utilisation d'un vocabulaire médical pour désigner la radioactivité est assez courant. Par exemple, les auteures ont relevé, dans leur étude, l'utilisation fréquente de termes tels que « infection », « transmission », « maladie » et « virus ». Les étudiant.e.s considèrent généralement qu'une fois que les radiations pénètrent dans un corps, elles y « restent » jusqu'à ce qu'elles en ressortent ou en soient extraites, ce qui permet la comparaison avec un virus ou une bactérie. Dans ce cas, la radioactivité est perçue comme une entité matérielle et tangible pouvant s'accumuler et se transférer à d'autres corps. Cela renforce la vision des radiations comme une contamination bactérienne.

De façon analogue, les termes « isotopes », « radioisotopes », « atome » et « élément chimique » sont souvent présentés comme interchangeables. De plus, certain.e.s élèves pensent que les électrons jouent un rôle dans la formation d'isotopes. Cela peut provenir d'une confusion entre les concepts de « numéro de masse » et de « numéro atomique » (Tsapalis G. and all, 2013). Afin de comprendre la radioactivité, il est fondamental de faire face à l'abstraction du monde microscopique. Néanmoins, contrairement à la chimie où l'élément de base est l'atome, notion avec laquelle les élèves sont à l'aise, en physique nucléaire, l'élément de base est le noyau. Les élèves ont donc tendance à justifier des propriétés de la radioactivité avec des processus chimiques. Cela est une source importante de raisonnements erronés pour les élèves et mène à la confusion entre les notions « d'isotopes », « de radioisotopes » et « d'atomes » (Morales López A.I. et Tuzón Marco P., 2021). Nous nous attarderons davantage sur les préconceptions qui découlent de l'analogie avec la chimie par la suite.

Finalement, les processus de fission et de fusion nucléaire sont souvent indifférenciés dans les raisonnements des élèves. Tsapalis G., Hartzavalos S. et Nakiboglu C. (2013) ont réalisé une recherche dans laquelle il était demandé à des étudiant.e.s grec.que.s et turc.que.s de lire un article parlant d'une centrale nucléaire innovante. Les résultats ont montré que de nombreux.e.s étudiant.e.s n'ont pas compris que l'article traitait de la fusion nucléaire et non de la fission. Il est possible que cette erreur émane du fait que les étudiant.e.s pensent, à tort, que les réactions nucléaires ne concernent que la fission nucléaire. En outre, peu d'élèves

connaissent le fonctionnement de ces processus nucléaires et affirment, par exemple, que, lors de la fission, les atomes se divisent en protons et en électrons. De plus, certain.e.s étudiant.e.s considèrent l'énergie thermique comme une cause et non comme une conséquence du processus nucléaire. Tsaparlis G. et ses collègues (2020) ont montré que, même après l'apprentissage, les élèves sont rarement capables d'expliquer le processus de fusion nucléaire, que ce soit en écrivant l'équation pour la fusion de l'hydrogène dans le Soleil ou l'utilisation correcte de l'équation $E = mc^2$.

2.7. Préconceptions dans d'autres sciences

Nous allons maintenant nous concentrer sur les conceptions erronées dans le domaine de la chimie ayant un lien avec la physique nucléaire. Nakiboglu C. et Tekin B. B. (2006) ont repéré plusieurs préconceptions liées à l'énergie de liaison. Par exemple, les élèves pensent que cette énergie correspond à la force qui maintient les nucléons du noyau ensemble ou qu'il s'agit de l'énergie dégagée lorsque deux atomes se réunissent pour former une molécule. On voit bien ici que ces conceptions alternatives vont limiter la compréhension de ce concept. Scientifiquement, l'énergie de liaison correspond plutôt à l'énergie qu'il faut fournir au noyau atomique pour dissocier ses nucléons.

D'après Nakiboglu C. et Tekin B. B. (2006), la stabilité nucléaire est également une notion à laquelle sont liées beaucoup de conceptions erronées. Comme exprimé dans les préconceptions en lien avec le concept de demi-vie, beaucoup d'élèves pensent que le nombre d'électrons sur la couche de valence est l'un des facteurs qui influencent sa stabilité. On observe également d'autres facteurs influençant, d'après les élèves, la stabilité d'un atome tels que la densité du noyau, le numéro atomique de l'atome, le nombre de masse de cet atome ou même, le rapport entre ces deux nombres. Dans l'étude de Kohnle A., Mclean S. et Aliotta M. (2011), les auteurs ont cherché à mettre en évidence le lien entre le défaut de masse et l'énergie de liaison. Pour ce faire, ils ont regroupé en deux catégories les réponses des étudiant.e.s disant que la masse de l'état lié était supérieure à la masse des particules individuelles. D'une part, les élèves pensent que les états liés possèdent une énergie de liaison supplémentaire qui augmente la masse totale. Il peut s'agir d'une fausse analogie avec un système mécanique ou électromagnétique dans lequel le rapprochement de deux charges identiques induit un apport d'énergie. Cela s'explique par le fait que les élèves sont beaucoup plus familiarisés avec la force électromagnétique qu'avec la force nucléaire. D'autre part, les étudiant.e.s estiment que, comme lors de la fission, de l'énergie est libérée, cela implique que la masse de l'état lié doit être supérieure. En suivant ce raisonnement, ces mêmes élèves auraient alors eu du mal à expliquer le processus de fusion nucléaire.

De plus, les étudiant.e.s confondent les réactions nucléaires et chimiques. Comme vu précédemment, les raisonnements erronés liés à l'énergie de liaison sont des raisonnements

chimiques pour lesquels leur transposition à la physique nucléaire est source d'erreurs. Des élèves estiment également qu'un atome possédant une couche de valence pleine, possède un noyau stable. Cette analogie s'explique par le fait que, dans le cas d'un gaz noble, aucune liaison chimique n'est possible. Une fois encore, cette correspondance entre la physique et la chimie conduit à des raisonnements erronés.

Une dernière préconception intéressante dans le cadre de la physique nucléaire est celle en lien avec les notions mathématiques de probabilité. Cette difficulté réside dans l'idée que « le hasard est incompatible avec les prédictions et les lois » (Hull M. and all, 2020). En effet, les élèves interprètent le hasard comme étant à l'opposé de la prédictibilité. Cette difficulté conceptuelle a des répercussions dans le domaine du nucléaire et induit une vision déterministe des phénomènes. Par exemple, la désintégration radioactive est un phénomène aléatoire. Toutefois, avec une vision déterministe, les étudiant.e.s peuvent arriver à la conclusion que la désintégration de chaque atome est prévisible. Un autre exemple est de concevoir l'impact du rayonnement radioactif comme déterministe, c'est-à-dire que chaque exposition à ce rayonnement engendre une conséquence au niveau de la santé. Dans les faits, comme il s'agit d'un phénomène probabiliste, chaque contact avec un rayonnement ne mène pas systématiquement à la formation d'un cancer. On comprend alors mieux le lien entre les préconceptions en physique nucléaire et les difficultés intrinsèques aux probabilités.

Cette analyse de la littérature nous a permis d'identifier les principales conceptions erronées dans le cadre de la physique nucléaire. Grâce à cela, nous avons pu identifier celles que nous allons davantage explorer dans notre recherche. Nous expliquons dans ce chapitre suivant, portant sur la méthodologie, les préconceptions retenues et comment, à l'aide d'un enchaînement spécifique de questions, nous voulons mesurer l'implication de chaque étudiant.e.s dans ces conceptions alternatives.

Chapitre 3

Méthodologie

Dans ce chapitre, nous aborderons les différentes étapes du processus de recherche, de la construction du questionnaire à l'analyse des résultats, qui a été réalisée à l'aide de la Théorie des Champs Conceptuels. Dans le chapitre suivant, nous aborderons d'avantage le cadre théorique utilisé dans cette étude. Cette recherche a volontairement une approche qualitative car son but est de traiter le système explicatif caché derrière les représentations erronées des apprenant.e.s. Cette étude n'a pas pour vocation de décrire de manière exhaustive toutes les incompréhensions possibles autour de la physique nucléaire ni d'avoir une vision globale de la pensée des élèves francophones belges en général. C'est pourquoi une étude qualitative semble plus pertinente qu'une approche quantitative, l'objectif étant de traiter chaque réponse individuellement afin de comprendre le raisonnement de chaque apprenant.e.s et non pas de réaliser un sondage représentatif de l'opinion des adolescent.e.s sur le nucléaire.

3.1. Conceptions erronées

La première étape de ce mémoire a été d'identifier les préconceptions possibles des étudiant.e.s en se basant sur le programme de 6^e secondaire belge francophone en sciences de base ainsi que sur la littérature. Une préconception, aussi appelée conception alternative est l'idée initiale qu'un.e élève peut avoir sur un concept donné (Driver R. and all, 2015). Dans le cadre du cours de sciences, il s'agit de la pensée première que possède un.e élève à propos d'une thématique, et ce, sans avoir suivi le moindre cours dessus. Lors d'une situation-problème, l'apprenant.e va raisonner avec ce qu'elle/il connaît déjà et va donc utiliser ses préconceptions afin de formuler un raisonnement. Les préconceptions servent donc de porte d'entrée lors d'une situation nouvelle, de racines du raisonnement. Les conceptions alternatives peuvent, d'une part, servir de moteur pour aider à la compréhension et, d'autre part, desservir l'apprentissage. Par exemple, une relation courante dans la vie quotidienne est le lien entre l'accélération et l'augmentation de la vitesse. En effet, dans le sens commun, une accélération s'accompagne d'un accroissement de la vitesse. C'est le cas, par exemple, lorsqu'on appuie sur la pédale d'accélérateur d'une voiture. Cette relation est appelée un théorème-en-acte. Un.e apprenant.e.s peut juger cette corrélation pertinente dans le cadre de la désintégration radioactive. Sa mise en application dans ce contexte n'est toutefois pas correcte et induit des raisonnements erronés. En effet, si un.e élève pense que le processus de désintégration radioactif peut être accéléré, cela la/le mettra en difficulté pour comprendre les notions en lien avec la demi-vie des isotopes radioactifs telles que les déchets

nucléaires ou encore la décontamination des sols. Ces préconceptions proviennent, la plupart du temps, d'expériences passées et sont solidement ancrées dans les raisonnements des élèves et résistantes au changement. Afin de faciliter l'apprentissage, il est nécessaire, mais difficile, de connaître les préconceptions d'un.e apprenant.e. C'est pourquoi une large partie de la recherche en didactique s'articule autour de l'identification de ces préconceptions et le développement d'outils pour aider les enseignant.e.s à y faire face (Reverdy C., 2018). D'autres éléments entrants en compte lors de l'apprentissage sont les facteurs dits « émotions-épistémiques ». Ces derniers touchent à la motivation des apprenant.e.s, à leurs intérêts pour l'apprentissage de la physique nucléaire et impactent significativement l'enseignement. C'est le cas, par exemple, si un.e élève pense que nucléaire peut servir à des fins médicales, cela peut impacter positivement son apprentissage que ce soit en jouant sur sa motivation ou en l'aidant à comprendre certaines notions comme les différentes émissions et leur pouvoir de pénétration. N'étant pas le focus de cette recherche, nous n'explorons pas d'avantage les facteurs émotion-épistémiques mais il semblait pertinent de les mentionner.

Maintenant que la notion de conceptions erronées est définie et illustrée, nous pouvons revenir à notre étude. Nous avons commencé par analyser le référentiel et les programmes scolaires. Ensuite, nous avons identifié 6 catégories de préconceptions possibles : « La radioactivité comme un processus dangereux », « La radioactivité comme un processus artificiel/naturel », « La demi-vie », « La production d'énergie », « Les rayonnements radioactifs » et « La fission/fusion nucléaire ». Nous avons sélectionné ces thématiques car elles représentaient, selon nous, les plus grands obstacles à la compréhension des apprenant.e.s.

3.2. Construction du questionnaire

Sur base de ces 6 thématiques, nous avons construit un questionnaire comprenant 24 questions. Ce dernier est construit d'un enchaînement de 4 questions pour chaque conception alternative permettant de mesurer le niveau d'implication de l'apprenant.e dans la préconception visée. De plus, les questions sont réparties sur trois niveaux, représentant la demande cognitive nécessaire pour y répondre. Le premier niveau est composé des questions d'un niveau déclaratif, aussi appelé prédictif. Ce sont des questions qui portent sur un savoir formalisé, comme c'est le cas dans les manuels scolaires. Elles ne demandent pas une mobilisation cognitive importante et permettent de mesurer le niveau de connaissances de base de la/du répondant.e. Ensuite, au deuxième niveau, nous avons les questions demandant davantage de recul sur la matière. Ce sont des questions de niveau opératoire concret ou explicatif. Il est demandé aux élèves de mettre en application leurs connaissances en faisant des liens entre les concepts. Dans le dernier niveau traitant du niveau inférentiel ou opératoire abstrait, il est demandé aux apprenant.e.s de prendre du recul par rapport aux notions et

d'apporter un jugement et/ou une inférence dans leur réflexion. Ces questions demandent un engagement cognitif plus important afin de résoudre un problème en situation. Le but de cet enchaînement de questions est de permettre de mesurer la cohérence entre les réponses pour identifier les préconceptions implicites mises en évidence dans leur raisonnement. La succession de 4 questions est constituée d'une question déclarative, deux questions du niveau explicatif et finalement, d'une question d'un niveau inférentiel.

Ci-dessous, nous présentons un exemple d'un ensemble de quatre questions conçues pour explorer la conception alternative suivante : « La radioactivité comme un processus dangereux » (le questionnaire complet est présenté en annexe de cette recherche).

1. La radioactivité est-elle un processus dangereux ? Détaillez votre raisonnement.
2. Est-il dangereux de manipuler un matériau émettant un rayonnement alpha ? Détaillez votre raisonnement.
3. En ne considérant pas les risques d'explosion, est-il dangereux d'habiter près d'une centrale nucléaire ? Détaillez votre raisonnement.
4. De nombreuses personnes reçoivent des radiations pour soigner leur cancer. Ces radiations sont-elles dangereuses pour la santé du patient ? Détaillez votre raisonnement.

Ensuite, le questionnaire a été soumis à un groupe de trois étudiant.e.s universitaires afin de valider la clarté des questions, leur alignement avec les objectifs de recherche et leur adéquation avec les réponses attendues. Après cette validation, les questionnaires ont été finalisés pour leur mise en œuvre effective dans la recherche.

3.3. Répondant.e.s

Lorsque notre questionnaire a subi les modifications nécessaires, ce dernier a été complété par 56 étudiant.e.s durant des sessions de 30 minutes. Nous avons défini 4 groupes à qui nous avons fait remplir le questionnaire. Le premier groupe comprend 21 étudiant.e.s en 1^{re} année de bachelier en sciences physiques et mathématiques. Le second était composé de 10 étudiant.e.s de 2^e et 3^e année à l'agrégation pour l'enseignement secondaire inférieur (AESI). Ce cursus les destine à être professeur.e.s de sciences dans les 3 premières années de l'enseignement secondaire belge francophone. Ensuite, le 3^e groupe regroupait 10 étudiant.e.s en master en sciences physique et, finalement, le 4^e groupe était constitué de 15 étudiant.e.s de l'agrégation en sciences, soit des futur.e.s enseignant.e.s de physique dans le secondaire supérieur (dans les 3 dernières années de l'enseignement secondaire). Ces étudiant.e.s suivent l'agrégation pour l'enseignement secondaire supérieur (AESS). Ce dernier groupe était le plus hétérogène car plusieurs études universitaires mènent à cette agrégation.

Ainsi, les répondant.e.s ont des formations variées telles que des masters en physique, en biologie, en ingénierie civile ou en bioingénierie. Il est intéressant de noter qu'une réforme de l'agrégation est attendue pour la rentrée scolaire prochaine. Cela pourrait, à l'avenir, modifier les conditions d'inscriptions et donc, le profil des candidat.e.s professeur.e.s. Il est important de souligner que nous avons utilisé le même questionnaire quel que soit le parcours éducatif de l'étudiant.e.

Ces groupes nous permettent à la fois de voir l'impact que le niveau éducatif peut avoir sur la compréhension du nucléaire, mais également de soulever les préconceptions récurrentes chez les futur.e.s enseignant.e.s. Comme dit précédemment, l'approche qualitative semble être la plus adaptée pour ce genre de recherche. Nous avons comme volonté de réaliser une étude qui permette de comprendre en profondeur le système explicatif des élèves afin de mettre en évidence les éléments clefs de leur raisonnement. En réalisant une étude quantitative, l'approche serait tout à fait différente et mettrait en lumière d'autres éléments tels que les grandes lignes de pensées des étudiant.e.s ou la proportion des étudiant.e.s capables de faire des inférences sur base de leurs connaissances. Avec notre approche, basée sur l'individu, nous nous concentrons sur les problèmes de conceptualisation de chaque étudiant.e interrogé.e. C'est pourquoi, l'échantillon choisi et sa capacité à représenter une population donnée n'a pas de grands impacts sur les résultats obtenus et présentés par après.

3.4. Analyse des résultats

En nous appuyant sur la méthodologie d'analyse de contenu de Bardin (1993), nous avons cherché à établir des catégories de réponses permettant d'identifier les conceptions des étudiant.e.s interrogé.e.s. L'analyse des résultats s'est couplée ensuite avec la Théorie des Champs Conceptuels et s'est réalisée en deux temps. Tout d'abord, nous nous sommes concentré.e.s sur l'analyse des questions de type déclarative afin de mettre en évidence les différences évidentes entre les préconceptions présentes chez les 4 groupes de répondant.e.s. Pour chaque préconception, nous avons résumé les réponses obtenues par des mots ou des expressions simples. Nous avons ensuite créé des catégories sur base de ces résumés afin de regrouper ensemble les réponses similaires et de pouvoir quantifier la fréquence à laquelle apparaissait tel ou tel raisonnement chez les apprenant.e.s. Ensuite, nous avons effectué une lecture de renforcement pour les questions explicatives et inférentielles pour déterminer si celles-ci accentuaient ou non la conception alternative. De cette façon, nous pouvons traiter les préconceptions de manière évolutive afin de voir, à quel stade dans la demande cognitive s'arrête la compréhension des élèves. Par exemple, il est possible qu'un.e élève réponde correctement à une question prédictive mais ne puisse pas mettre en application cette connaissance pour faire des liens ou une inférence lors des questions suivantes. A l'inverse, l'élève peut ne pas avoir un bagage de connaissances suffisant pour répondre aux questions

déclaratives, mais sur base de ces réponses pour les questions opératoires, nous pouvons inférer son niveau d'engagement dans chacune des conceptions erronées visées. La démarche systématique d'analyse des résultats nous permet donc de mettre en lumière les problèmes et les limites de la compréhension des élèves.

Chapitre 4

Cadre théorique

Cette recherche s'inscrit dans le courant constructiviste et utilise la Théorie des Champs Conceptuels comme cadre théorique. Cette théorie se base sur l'approche piagétienne, enrichie ensuite par Vygotsky et Vergnaud. Cette section posera donc le cadre théorique et résumera les concepts-clés de ces différentes contributions. Finalement, nous illustrerons les différentes notions à l'aide d'exemples empruntés à la physique newtonienne et nucléaire, ainsi qu'à la thermodynamique.

4.1. Processus d'apprentissage

D'après Piaget J. (1970), l'apprentissage se fait grâce à l'interaction entre le sujet et l'objet de la connaissance. Le sujet est actif lors de son apprentissage, car il cherche à comprendre le monde qui l'entoure. Le fonctionnement cognitif du sujet est fait par l'utilisation des "schèmes", qui lui permet d'organiser l'activité lorsqu'elle/il se retrouve face à une nouvelle situation. Les schèmes sont à la base de l'action humaine, y compris de notre système de pensée.

Plus précisément, c'est une organisation invariante de l'activité pour une classe de situations définie. L'invariance caractérise l'organisation et non l'activité ; le schème n'est pas un stéréotype ; il permet au contraire de traiter la contingence et la nouveauté, ce qui ne serait pas le cas s'il s'agissait d'un stéréotype. S'adressant à une classe de situations, c'est un universel. Pour étudier l'activité des individus, (...) il est donc nécessaire d'identifier les différentes catégories de situations auxquelles ils sont confrontés (...). (Plaisance, É. & Vergnaud, G., 2012).

Les schèmes comportent des composants conceptuels, étroitement liés au niveau de connaissance d'un sujet sur un domaine spécifique du savoir. Dans ce contexte, les conceptions alternatives font parties de ces schèmes. Lors de l'apprentissage, deux processus entrent en jeu : l'assimilation et l'accommodation. C'est cette alternance entre l'assimilation et l'accommodation qui va être motrice du développement cognitif de l'apprenant.e.

L'assimilation est la porte d'entrée de l'apprentissage. Il s'agit de l'internalisation de la nouvelle situation-problème par l'apprenant.e et n'est jamais une copie du réel, mais plutôt une interprétation de celui-ci par le sujet. Si l'objet assimilé ne paraît pas trop éloigné de ce

qui est déjà connu de l'apprenant.e alors il n'y aura pas de modification du schème. L'assimilation permet donc d'agrandir l'ensemble des situations et des connaissances dans lequel nos schèmes s'appliquent mais sans en modifier le contenu.

L'accommodation, quant à elle, correspond à la modification ou à la création d'un schème. C'est le cas lorsqu'aucun schème existant ne permet de traiter la nouvelle situation rencontrée par l'individu ou lorsqu'un ancien schème doit être remanié. Cela permet d'agrandir notre structure de connaissance. Il est important de noter que si l'effort à fournir est trop important, c'est-à-dire, si le saut entre le schème actuel et les modifications à y apporter pour intégrer la nouvelle situation-problème est trop grand, le développement intellectuel ne se fera pas.

Cette zone dans laquelle l'apprentissage est possible s'appelle la zone de développement proche (Vygotsky L., 1997) ou zone de développement proximale. Si un nouvel objet de la connaissance appartenant à cette zone est présenté à un sujet, ce dernier va être capable de mettre en œuvre le processus d'accommodation afin d'adapter ses schèmes et de prendre en compte ce nouvel élément. A l'inverse, si la situation-problème n'appartient pas à la zone de développement proche, le sujet ne va pas être en mesure de réaliser le processus d'accommodation, pourtant nécessaire à l'apprentissage de cette nouvelle situation.

Jusque-là, nous avons donc compris l'existence de deux procédés permettant l'apprentissage : l'assimilation et l'accommodation. Il reste néanmoins à comprendre comment le processus d'accommodation prend place. Quel est le moteur permettant la modification ou l'ajout d'un schème ? Le procédé qui sous-tend la modification de la structure de connaissances et donc l'accommodation, est le conflit cognitif. Lorsqu'une nouvelle situation-problème ne pouvant pas être résolue par assimilation se présente à un individu, celui-ci se trouve en situation de déséquilibre. En effet, aucun schème présent ne permet de résoudre cette situation. Autrement dit, il y a un déséquilibre entre les préconceptions de l'élève et la situation d'apprentissage. Afin de résoudre ce déséquilibre, une modification des schèmes est nécessaire. En d'autres termes, le déséquilibre cognitif observé par l'apprenant.e est résolu grâce au processus d'accommodation, à l'ajout ou à l'adaptation d'un schème préexistant. Le conflit cognitif est donc un élément essentiel à l'apprentissage car il permet à l'élève de modifier sa structure de pensées et d'agrandir ses connaissances.

L'acquisition de nouvelles connaissances n'est donc pas directe et passe par un conflit cognitif. On comprend alors toute l'importance d'être conscient.e des préconceptions possibles afin de favoriser le conflit cognitif pour inciter l'élève à apprendre. C'est en les reconnaissant que les enseignant.e.s peuvent mettre les conceptions alternatives en défaut pour faire évoluer le système explicatif de l'apprenant.e. Sans conflit cognitif, aucune accommodation, donc aucune modification des schèmes n'a lieu, ne permettant pas aux élèves de prendre en compte la nouvelle situation d'apprentissage.

Afin d'illustrer ces processus, nous proposons un exemple issu de la thermodynamique. Scientifiquement, la température est la mesure de l'agitation des particules dans un système. La chaleur, quant à elle, est un transfert d'énergie lié à une différence de température entre deux systèmes. Avec ces définitions, on comprend pourquoi le fait de dire que "l'eau est chaude" n'est pas correct. En effet, "la chaleur" ressentie est, en réalité, le résultat d'une sensation tactile liée à la différence de température entre notre peau et l'eau. La chaleur, dans le cas de l'eau chaude, correspond au transfert d'énergie entre l'eau et l'air environnant. Pourtant, un.e élève peut avoir un schème intuitif, basé sur son expérience quotidienne, affirmant que "si l'eau est chaude, c'est qu'elle contient beaucoup de chaleur". Au fil de ses expériences, l'élève se voit confronté à la notion de température. Une assimilation possible de cette notion est d'utiliser les concepts de chaleur et de température comme des synonymes ; "si l'eau est chaude, cela veut dire que sa température est élevée". Dans ce cas, il n'y a pas de modifications du schème et le raisonnement de l'élève est inchangé. Par la suite, lors de l'apprentissage de la thermodynamique, des expériences simples permettent de mettre à défaut ce raisonnement. Par exemple, si l'apprenant.e se trouve confronté à une situation où un objet reçoit une certaine quantité de chaleur, mais que sa température ne varie pas, cela va créer un déséquilibre cognitif chez elle/lui. Ce déséquilibre va pousser l'élève à modifier ses schèmes, ce qui va induire un processus d'accommodation. Ces modifications des schèmes permettront à l'élève de distinguer correctement la notion de chaleur et celle de température au fil des activités d'enseignement.

4.2. Théorie des Champs Conceptuels

Le cadre théorique posé pour cette recherche est la Théorie des Champs Conceptuels (Vergnaud G., 1990). Il s'agit d'une théorie proposée par Gérard Vergnaud dans les années 90 et qui a pour but de modéliser les interactions entre l'apprenant.e et son environnement lors d'une situation-problème. La psychologie de Piaget a fortement influencé ce modèle. Elle a été initialement pensée dans le cadre de la didactique des mathématiques mais s'élargit aisément à la didactique des autres sciences. Nous avons choisi ce cadre théorique car il se prêtait bien aux objectifs recherchés de compréhension du processus de conceptualisation en physique. D'une part, celui-ci permet d'articuler de manière claire, à l'aide des invariants opératoires, les aspects subjectifs et culturels de la connaissance (Carvalho Jr G., 2024). D'autre part, grâce à la décomposition en théorèmes-en-acte et en concepts-en-acte, elle nous permet de suivre le raisonnement d'un.e apprenant.e et d'inférer son niveau de compréhension.

La Théorie des Champs Conceptuels nous permet de mieux comprendre les interactions entre les élèves et les situations et prend en considération la complexité de l'individu en action. Elle s'articule autour de deux blocs centraux. D'un côté, se trouvent les concepts, la composante

culturelle du savoir et de l'autre, le schème, la composante subjective. Les ponts entre ces deux éléments sont appelés les invariants opératoires. Lors de la rencontre d'une nouvelle situation, ici comprise comme une tâche, un défi, un problème à résoudre, etc, l'élève utilise un ensemble spécifique de schèmes et de concepts articulés autour d'invariants opératoires, favorisant ainsi son apprentissage. Nous allons détailler chaque élément théorique afin de mettre en évidence les liens intrinsèques qui existent entre eux. Il serait naïf de croire que le système de pensée d'un.e apprenant.e peut être réduit à ces quelques considérations. Toutefois, la Théorie des Champs Conceptuels permet de mettre en évidence des éléments pertinents liant les aspects intra- et intersubjectifs. Le nom de cette théorie provient, par ailleurs, de la volonté de mettre en lumière le lien qui existe entre une situation-problème, l'ensemble des concepts à mobiliser et les schèmes de l'apprenant.e.

Tout d'abord, les concepts sont des idées abstraites qui permettent d'interpréter et de comprendre des situations-problèmes. Il est important de saisir que ces concepts ne sont pas propres à l'apprenant.e mais que ceux-ci font partie des constructions culturelles utilisées par l'apprenant.e lors de la résolution d'un problème. Les concepts ne se limitent d'ailleurs pas à ce qui est enseigné à l'école, mais proviennent d'un contexte plus large. Les concepts sont donc inhérents au contexte dans lequel ils existent et sont partagés par un groupe d'individus. De plus, un concept n'est jamais mobilisé seul pour la résolution d'une situation-problème. Il est nécessaire de rassembler un ensemble de concepts afin d'identifier ceux qui sont pertinents lors de la résolution d'un problème. De même que pour les autres concepts, les concepts scientifiques sont centrés sur les situations qui leur donnent du sens et ne sont pas dénués de contexte. On peut les considérer comme une partie plus formelle de la culture (Carvalho Jr, 2024). Par exemple, si l'on considère le concept de radioactivité, celui-ci n'a de sens que s'il est inclus dans le champ conceptuel contenant d'autres concepts comme la désintégration, la demi-vie, les émissions, ... De plus, le concept de radioactivité appartient au contexte culturel dans lequel il s'inscrit. En effet, à travers l'histoire et notre compréhension des phénomènes radioactifs, le concept de radioactivité a été modifié. Durant le 20^e siècle, des avancées scientifiques majeures ont modifiées notre compréhension de ce phénomène et donc le concept s'y rapportant. Ensuite, les enjeux politiques, culturels et environnementaux entourant le nucléaire ont également transformé le concept de la radioactivité. Pour finir, selon Vergnaud, les concepts sont formés à la fois de l'ensemble des situations, des systèmes de représentations et des invariants opératoires. Ce sont ces trois éléments qui constituent les concepts, car c'est le contexte culturel qui donne du sens à l'action. L'apprenant.e et la culture coexistent et s'influencent simultanément ; d'une part la culture agit sur le système de pensée de l'élève, et d'autre part, celui-ci fait évoluer la culture.

Ensuite, le schème, comme dit précédemment, représente l'organisation invariante de l'apprenant.e dans une classe de situations données. Bien que chaque situation demande une réflexion particulière, l'organisation elle-même est invariante et est propre à chaque individu.

Selon Vergnaud, le schème permet aux individus d'agir dans une situation donnée, de comprendre les objectifs de l'action, d'identifier et d'appliquer les règles d'action et de contrôle, de formuler des inférences, et d'organiser à la fois les connaissances stabilisées dans leur répertoire cognitif et celles encore en construction. Lors du développement de l'individu, les schèmes permettent de reconnaître les éléments pertinents et de construire des relations dans le but de résoudre les tâches qui lui sont présentées. Ainsi, durant l'apprentissage, les schèmes existants sont modifiés ou de nouveaux schèmes sont créés. Il s'agit du processus d'accommodation.

Finalement, les liens entre les schèmes et les concepts sont les invariants opératoires, c'est-à-dire, les connaissances présentes soit dans le répertoire conceptuel d'un individu, soit partagées par les individus et disponibles dans la culture. Les invariants opératoires jouent donc le rôle de connexion entre les domaines subjectifs et culturels. Il est important de souligner qu'il n'y a pas de frontière claire entre ces deux sphères et qu'elles sont constamment source d'influence mutuelle. Les invariants opératoires permettent de passer de l'une à l'autre en prenant en considération les aspects intra et intersubjectifs.

Il y a deux catégories d'invariants opératoires : les "théorèmes-en-acte" et les "concepts-en-acte". Afin de modéliser le système explicatif d'un.e apprenant.e, il est important de tenir compte de deux caractéristiques d'une proposition : sa pertinence et sa véracité. Les concepts-en-acte représentent l'ensemble des concepts mobilisés par l'apprenant.e qu'elle/il a jugé pertinents. Les théorèmes-en-acte, quant à eux, sont l'ensemble des propositions jugées vraies par l'apprenant.e. Dans les deux cas, il s'agit évidemment d'un choix implicite mais ce modèle permet de retracer le chemin de pensée de l'apprenant.e. Ces deux éléments sont complémentaires car un raisonnement est correct s'il utilise à la fois des concepts pertinents et des théorèmes vrais. Ils se construisent à travers les interactions que l'individu a avec son environnement afin d'identifier les concepts pertinents et les théorèmes vrais dans un ensemble de situation. Les concepts-en-acte servent de base à la construction des théorèmes-en-acte. De plus, lorsqu'un théorème-en-acte s'est avéré vrai dans une situation, il peut, par la suite, devenir un concept-en-acte pour les actions suivantes. Les théorèmes-en-acte et les concepts-en-acte sont donc indissociables et simultanés. Il existe une dynamique constante pour passer de l'un à l'autre afin de favoriser le développement cognitif de l'apprenant.e. Un raisonnement erroné peut s'expliquer de deux façons, soit les concepts-en-acte utilisés ne sont pas pertinents dans la situation-problème donnée mais les théorèmes-en-acte sont vrais, soit, à l'inverse, les concepts-en-acte sont pertinents mais les théorèmes-en-acte sont faux.

Afin de clarifier le propos, il est utile de donner un exemple. Lors du développement de l'enfant et de l'adolescent, la notion du temps évolue. Cette dernière est très abstraite pour les jeunes enfants. Avec l'âge, les enfants acquièrent la compréhension du temps qui passe, de l'enchaînement des saisons, des heures dans une journée, des jours de la semaine, ... A

cela, s'ajoute le développement du raisonnement logico-mathématique qui permet aux élèves d'accroître leurs raisonnements. Un.e enfant peut alors comprendre que si elle/il a mangé la moitié de son assiette en 15 minutes, il lui faudra encore un quart d'heure pour la terminer. Ou encore, que si elle/il a fait un trajet dans le sens aller à vélo en un certain temps, il lui faudra le même temps pour le retour. Le théorème-en-acte qui se développe alors est la notion que « si la moitié d'une action prend un certain temps, l'autre moitié devrait prendre le même temps ». Les concepts-en-acte sous-tendant ce théorème peuvent être, par exemple, la linéarité du temps et de l'action, l'additivité du temps ou sa réversibilité. En continuant ses expériences, l'enfant peut se rendre compte que ce théorème-en-acte n'est pas vrai dans toutes les situations. Par exemple, si le trajet du retour à vélo se fait en pente descendante, le temps nécessaire sera moindre que celui de l'aller. Cela va permettre à l'enfant d'ajuster sa structure de connaissance et d'affiner ses théorèmes-en-acte et concepts-en-acte utilisés dans certaines situations. Lors de l'apprentissage de la physique nucléaire, il peut sembler pertinent à un.e apprenant.e d'utiliser les concepts-en-acte en lien avec la linéarité du temps et la proportionnalité directe entre le temps et l'action. Dans ce cas, elle/il conclura que, si après un temps T un élément radioactif a disparu de moitié, après $2T$ l'élément radioactif se sera complètement désintégré. Or, dans ce contexte, ces concepts-en-acte ne sont pas pertinents et conduisent à un raisonnement erroné. Pour apprendre, il est nécessaire que l'apprenant.e identifie ces concepts-en-acte comme non pertinents dans cette situation-problème et développe de nouveaux théorèmes-en-acte. Par cet exemple, nous comprenons bien que les invariants opératoires jouent un rôle capital dans le processus de création du savoir.

Avec ce bagage supplémentaire, il est intéressant de revenir sur les notions de préconceptions et de conflit cognitif définis précédemment. Si l'on considère que les théorèmes-en-acte et les concepts-en-acte font partie du schème et des concepts d'un individu, ils représentent en partie ce qui a été appelé jusque-là une préconception. En effet, les théorèmes-en-acte et les concepts-en-acte se construisent à l'aide des expériences passées et peuvent à la fois, provenir de nos interactions précédentes personnelles (c'est-à-dire du schème) ou de la culture qui nous entoure via, par exemple, notre entourage ou les médias. Dans ce cas, il s'agit de la composante culturelle des concepts. Lors d'un apprentissage, il faut favoriser l'apparition d'un conflit cognitif afin de déséquilibrer les conceptions alternatives et permettre le processus d'accommodation. D'un point de vue de la théorie des champs conceptuels, un léger changement s'opère au niveau des schèmes lorsqu'un concept-en-acte est reconnu comme non pertinent ou lorsqu'un théorème-en-acte est identifié comme faux dans une nouvelle situation. Reconnaître une conception erronée revient à modifier un ou plusieurs schèmes chez l'apprenant.e. C'est ce procédé qui mène à l'apprentissage par l'apprenant.e.

Si nous revenons à notre recherche, son point central est donc de reconnaître les invariants opératoires (théorèmes-en acte et concepts-en-acte) utilisés par les répondant.e.s afin d'inférer leur niveau de construction conceptuelle. En effet, les invariants opératoires sont essentiels car leur identification permet de mettre en lumière le cheminement interne de la/du répondant.e. Dans les faits, sur base des réponses, nous pouvons inférer les théorèmes et concepts-en-acte utilisés par l'apprenant.e et ainsi observer leur évolution au fil des questions. Les questions étant construites dans l'ordre croissant de demande cognitive, nous pouvons ainsi mettre en évidence les potentielles évolutions des concepts-en-acte jugés pertinents et les ruptures dans le système explicatif de l'élève et ce, pour chacun des questionnaires.

Chapitre 5

Analyse des résultats

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus suite à notre recherche. Pour rappel, nous avons fait compléter le questionnaire à 4 groupes d'apprenant.e.s (étudiant.e.s en bachelier en sciences physique et mathématique, étudiant.e.s en agrégation en sciences dans l'enseignement secondaire inférieur (AESI), étudiant.e.s en master en sciences physiques et étudiant.e.s en agrégation en sciences dans l'enseignement secondaire supérieur (AESS)). Le questionnaire a été construit afin d'interroger chacune des 6 préconceptions identifiées grâce à des questions déclaratives, explicatives et inférentielles. L'analyse de contenu (Bardin, 1993), couplée avec la Théorie des Champs Conceptuels, nous a permis de mettre en évidence le système explicatif des répondant.e.s. Le questionnaire vierge est disponible en annexe et les questionnaires complétés sont disponibles via un lien internet se trouvant également en annexe.

Nous rappelons qu'il s'agit d'une étude de cas, c'est-à-dire d'une étude qualitative qui a pour objectif d'entrer en profondeur dans les réponses des étudiant.e.s afin d'inférer leur structure explicative. Les pourcentages présents ci-dessous permettent de mettre en lumière la fréquence à laquelle apparaît tel ou tel invariant opératoire mais ne se veulent, en aucun cas, être représentatifs d'une quelconque population. Notre recherche, du fait de sa caractéristique qualitative, est ancrée dans le contexte qui lui donne naissance. Il s'agit d'étudiant.e.s scolarisé.e.s dans le système scolaire belge francophone.

5.1. La radioactivité comme un processus dangereux

5.1.1. Étudiant.e.s en bachelier et en AESI

La première préconception analysée est la dangerosité de la radioactivité. 90% des étudiant.e.s en bachelier en sciences physique et mathématique considèrent que tous les types de rayonnements sont dangereux. Toutefois, plus de la moitié de ces répondant.e.s ont justifié la dangerosité de la radioactivité par la quantité de radiations plutôt que par la différence entre les types de rayonnements. Cela contraste avec le fait que 65% des répondant.e.s affirment qu'il n'est pas dangereux de manipuler une source de rayonnement alpha. On peut en déduire que les étudiant.e.s connaissent théoriquement la différence entre les types de rayonnement et leur pouvoir pénétrant dans la matière mais qu'elles/ils ne savent pas utiliser cette connaissance théorique lors d'un raisonnement opératoire. Dans ce cas-ci, le concept-en-acte lié à la pénétration des différents types de rayonnements radioactifs n'a

pas semblé pertinent pour les étudiant.e.s. Ces dernier.ère.s ont plutôt utilisé le concept-en-acte lié à la quantité de rayonnement ou à la dose de radiations. Elles/ils ont formulé un théorème-en-acte qui peut être exprimé ainsi : “Les émissions radioactives entraînent des modifications indésirables dans le corps humain”. En effet, 47% des étudiant.e.s ont utilisé une justification en lien avec la dangerosité de la radioactivité pour la santé ou l’altération possible de l’ADN. Cela expliquerait donc qu’autant de répondant.e.s pensent que la radioactivité est un processus dangereux. Finalement, la question inférentielle portait sur l’utilisation de la radioactivité pour soigner les cancers. 80% des répondant.e.s ont estimé que ces traitements n’étaient pas dangereux pour les patient.e.s et elles/ils ont justifié cette utilisation de la radioactivité par le fait que les rayonnements étaient “bien utilisés” ou “concentrés sur une zone” ou encore, que le traitement était “moins pire que le cancer”.

Pour les futur.e.s enseignant.e.s de sciences dans le secondaire inférieur, le constat est similaire. 9 répondant.e.s sur 10 ont affirmé que les rayonnements étaient nocifs pour la santé car ils “dégradent l’ADN” et “traversent le corps humain”. La différence principale avec le groupe précédent réside dans le fait que moins de la moitié des répondant.e.s connaissaient la différence entre les types de rayonnements.

5.1.2. Étudiant.e.s en master et en AESS

Pour les étudiant.e.s du troisième groupe, les étudiant.e.s de master, 40% ont remarqué d’emblée que la dangerosité d’un rayonnement dépendait du type de rayonnement. Les autres ont utilisé un raisonnement similaire aux étudiant.e.s de bachelier en invoquant la quantité de rayonnement ou le temps d’exposition. Néanmoins, aucun.e étudiant.e n’a utilisé le théorème-en-acte observée dans les autres groupes “Les processus radioactifs libèrent des rayonnements nocifs pour le corps humain”. On peut donc en conclure que, globalement, les étudiant.e.s en master, grâce à leur parcours académique, arrivent davantage à se détacher des conceptions erronées. Les deux tiers des étudiant.e.s interrogé.e.s ont d’ailleurs pu identifier une source de rayonnement alpha comme une source inoffensive et ont pu le justifier correctement à l’aide du pouvoir pénétrant de ce type de rayonnements.

Finalement, les étudiant.e.s en agrégation pour l’enseignement secondaire supérieur, quant à elles/eux, montrent des résultats assez hétérogènes. Cela peut s’expliquer en analysant leur parcours académique et professionnel varié. En effet, l’agrégation est accessible via plusieurs cursus, après l’obtention de différents master. Certain.e.s étudiant.e.s ont obtenu un master en physique, en biologie, ingénierie civile, bioingénierie,... Cela entraîne l’existence de différents profils au sein de cette formation et explique les différences importantes dans les réponses au questionnaire. De fait, seulement 13% des étudiant.e.s interrogé.e.s ont cité le lien entre la dangerosité d’une source radioactive et le type de particules émises. Les autres étudiant.e.s ont principalement lié la dangerosité d’un élément radioactif avec le temps

d'exposition ou la dose de rayonnements, comme cela a déjà été observé dans les autres groupes. Toutefois, seul.e 1 étudiant.e a utilisé le théorème-en-acte identifié précédemment et a cité l'impact des radiations sur la santé. Il est intéressant de noter que près de la moitié des étudiant.e.s n'ont pas été en mesure de déterminer si la manipulation d'une source radioactive émettant un rayonnement alpha était dangereuse. Un tiers des répondant.e.s ont, à l'inverse, répondu correctement en utilisant le concept-en-acte de la pénétration des différents rayonnements. Cela montre encore une grande disparité entre les répondant.e.s.

5.1.3. Graphiques

Pour illustrer cela, nous terminons cette section avec quelques graphiques en comparant les réponses obtenues et les justifications en fonction des groupes de répondant.e.s. Le premier graphique reprend les réponses obtenues pour la question déclarative dans laquelle il était demandé aux étudiant.e.s d'expliquer si la radioactivité est un processus dangereux. On observe, comme annoncé précédemment, une meilleure nuance apportée chez les étudiant.e.s de master et la présence prononcée de cette préconception chez les répondant.e.s de bachelier et de l'AESI. Ceci est exprimé en pourcentage.

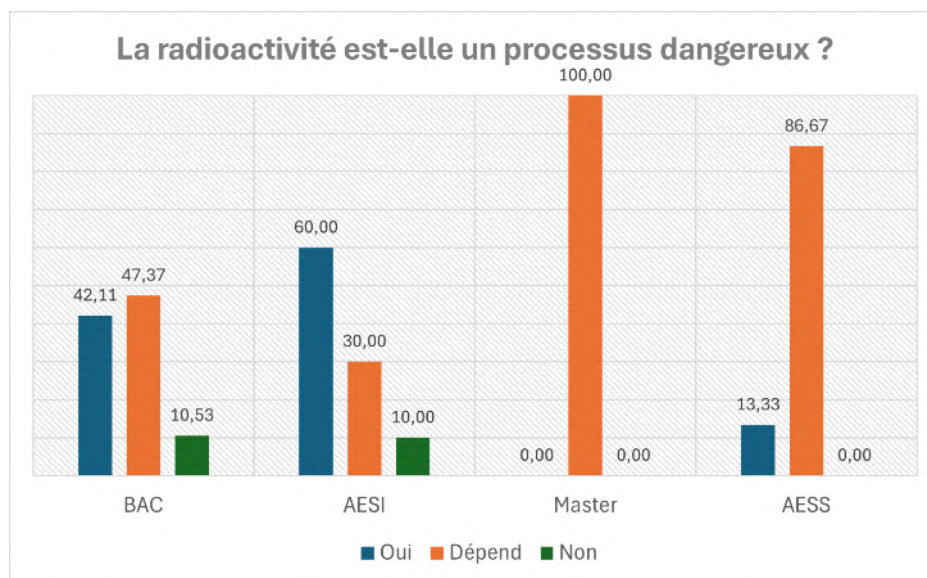


Figure 1 : La radioactivité est-elle un processus dangereux ? Source : Auteure

Nous avons, par la suite, repris les justifications données par les étudiant.e.s ayant répondu que la dangerosité dépendait de certains facteurs. Nous pouvons ainsi observer les conclusions mises en évidence auparavant. Chez les deux premiers groupes, nous observons la forte présence des concepts-en-acte en lien avec la quantité de radiations. Ce concept-en-acte diminue chez les étudiant.e.s de master au profit des types de rayonnements, qui est le concept-en-acte pertinent dans cette situation. Les concepts-en-acte de temps d'exposition

et d'utilisation de l'élément radioactif sont minoritaires mais restent significatifs. Les étudiant.e.s de l'AESS présentent une grande diversité dans les concepts-en-acte utilisés mais seul celui en lien avec le type de rayonnement est pertinent. C'est donc les répondant.e.s en master qui obtiennent les meilleurs résultats, permettant d'observer une corrélation entre le niveau d'études et l'utilisation des concepts-en-acte pertinents. Cela appuie la nécessité d'avoir une formation complète et rigoureuse pour les futur.e.s enseignant.e.s, que ce soit dans le degré supérieur ou inférieur.



Figure 2 : Justification de la dangerosité du nucléaire. Source : Auteure

Finalement, nous terminons cette analyse avec un graphique représentant les réponses correctes et erronées données par les répondant.e.s selon leur groupe. Nous considérons dans ce graphique, les deux questions de niveau opératoire concret, c'est-à-dire celles demandant une application des concepts théoriques. On observe, globalement, une meilleure utilisation de leur connaissance chez les étudiant.e.s de master et, dans un second temps, chez celles/ceux de bachelier. Les résultats des répondant.e.s en agrégation, dans le secondaire inférieur ou supérieur montrent une lacune à ce niveau-là, insistant la nécessité de renforcer la formation de ces enseignant.e.s en devenir.

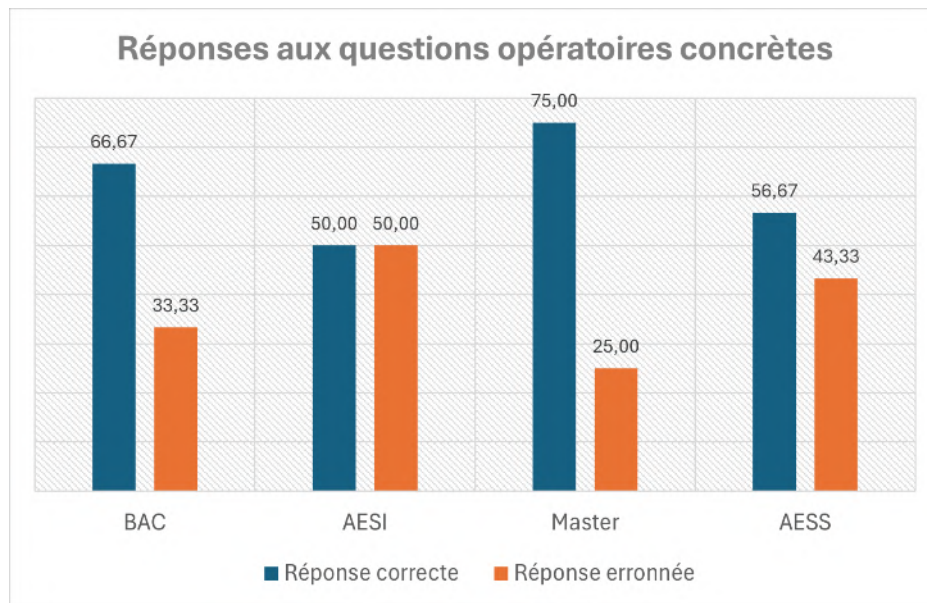


Figure 3 : Réponses aux questions opératoires concrètes. Source : Auteure

5.2. La radioactivité comme un processus artificiel/naturel

La deuxième préconception portait sur le caractère artificiel de la radioactivité. Nous avons lié cette conception erronée avec 3 autres questions de type opératoire. Les questions portaient sur la présence de radon en Belgique, l'uranium des centrales nucléaires et la datation au carbone 14.

5.2.1. Étudiant.e.s en bachelier

Tous les étudiant.e.s de bachelier ont répondu que la radioactivité était un processus naturel et certain.e.s ont même justifié cela à l'aide d'exemples comme les radiations du Soleil, de notre corps, des bananes, ... On peut donc en conclure qu'elles/ils ne présentent pas de trace de cette préconception. Néanmoins, en analysant les questions requérant une plus grande demande cognitive, nous pouvons étayer notre analyse. D'une part, seulement 62% des répondant.e.s ont pu faire le lien entre leur réponse précédente et le fait que le radon est présent naturellement dans les sols. Cela montre qu'elles/ils sont capables d'explicitier un savoir formalisé, probablement vu en cours, mais ne savent pas toutes/tous utiliser cette connaissance lorsqu'il faut produire un raisonnement explicatif. Certain.e.s étudiant.e.s ont justifié cela avec la présence d'appareils électroniques, de matériaux radioactifs utilisés à l'époque où les risques de la radioactivité n'était pas connus (dans la peinture notamment). D'autre part, 62% des étudiant.e.s ont justifié le caractère inoffensif de la datation au ^{14}C grâce au type de rayonnement non dangereux, à la faible quantité d'émissions et au long temps de demi-vie de cet isotope. Par le prisme de la Théorie des Champs Conceptuels, ces justifications

sont des concepts-en-acte qui ont été jugés pertinents par ces étudiant.e.s qui ont permis de formuler des théorèmes-en-acte ayant, à leur tour, permis de répondre à la question. Un des théorèmes-en-acte possible peut être énoncé de la façon suivante “Le ^{14}C est un isotope émettant des particules bêta qui sont peu pénétrantes, donc peu dangereuses pour le corps humain”. On peut donc en conclure que, bien que tous les étudiant.e.s puissent répondre correctement à la question du niveau prédicatif, nous retrouvons tout de même des traces de cette préconception dans les questions opératoires. En effet, un peu plus de la moitié des étudiant.e.s arrivent à se détacher de cette préconception lorsqu’il leur est demandé de justifier la présence de radon ou l’utilisation du ^{14}C pour la datation d’objets archéologiques. Pour l’uranium utilisé dans les centrales nucléaires, la moitié des répondant.e.s ont explicitement dit que l’uranium était présent naturellement puis enrichi avant d’être utilisé.

Pour illustrer notre propos, voici un enchaînement de questions et de réponses données par un.e répondant.e pour la conception erronée liée à la radioactivité comme un processus artificiel.

- **La radioactivité est-elle présente naturellement ou est-ce une invention humaine ?**

La radioactivité est présente / existe naturellement. (Même si tout ce qui existe, existe, par définition, naturellement.

- **En Belgique, les habitants sont exposés à la présence du radon (un dérivé de l’uranium) dans les logements. Comment expliquez-vous la présence d’un élément radioactif dans les habitations ?**

Très bonne question. Des restes de la catastrophe de Tchernobyl ?

- **L’uranium utilisé dans les centrales nucléaires, est-il présent naturellement ou est-il fabriqué artificiellement ?**

Il est présent naturellement.

- **La carbone 14 (^{14}C) est un élément radioactif utilisé comme “chronomètre” pour estimer l’âge d’objets retrouvés lors de fouilles archéologiques. Ce processus est appelé “la datation au ^{14}C ”. Les archéologues manipulent le ^{14}C sans équipement particuliers. Pourquoi n’y-a-t-il pas de protocoles de protection liés à la radioactivité du ^{14}C pour protéger les archéologues ?**

Je suppose que la désintégration du ^{14}C émet des rayonnements trop peu énergétiques pour traverser la peau ?

Dans cet exemple, lors de la première réponse, il est clair que la/le répondant.e sait théoriquement que la radioactivité est un processus naturel. Elle/il le réaffirme dans la troisième question à propos de l'uranium. Elle/il n'a pas parlé.e de l'enrichissement de l'uranium mais il est évident pour elle/lui que des éléments radioactifs sont présents naturellement. Toutefois, grâce à la deuxième question, on remarque que l'étudiant.e n'a pas utilisé ce concept-en-acte, lié à la présence naturelle d'élément radioactif. Si celle-ci/celui-ci n'a pas jugé ce concept-en-acte pertinent pour cette question, cela pourrait montrer que la préconception "le processus radioactif est artificiel" est toujours présente dans son raisonnement. De plus, sa réponse, qui est en lien avec une catastrophe nucléaire passée d'origine humaine, renforce cette conception erronée. Le théorème-en-acte utilisé par la/le répondant.e est "La présence d'un composé radioactif est due à une action humaine". Nous avons montré ici que, grâce à cet enchaînement de questions, la présence d'une conception préalable chez la/le répondant.e.

5.2.2. Étudiant.e.s en AESI, master et AESS

Nous allons maintenant nous attarder sur les trois autres groupes de la recherche. Chez les étudiant.e.s de l'AESI, 80% des répondant.e.s disent que le processus radioactif est un processus naturel. Cependant, seulement 20% des étudiant.e ont utilisé ce théorème-en-acte pour inférer la présence de radon dans les habitations. Nous arrivons donc à la même conclusion que précédemment ; la préconception visée est bien présente dans le raisonnement des répondant.e.s.

Si l'on considère ensuite les étudiant.e.s en master et celles/ceux de l'AESS, les conclusions sont de moins en moins marquées, signe que la conception erronée est moins présente. Tous les étudiant.e.s de master et d'agrégation affirment que la radioactivité est un processus naturel. Par ailleurs, 60% des répondant.e.s en master et 87% des répondant.e.s en agrégation ont utilisé ce concept-en-acte pour en déduire la présence de radon dans les habitations. On observe donc, à travers les niveaux d'éducation, une légère amélioration dans la cohérence des réponses et une capacité à se détacher de la conception première. En effet, 62% des étudiant.e.s de bachelier et 20% des étudiant.e.s de l'AESI justifient la présence d'un élément radioactif en utilisant un raisonnement sans mentionner la préconception. Ce chiffre passe à 60% et puis à 87% pour les étudiant.e.s étant en master et de l'AESS, détenant donc déjà un master disciplinaire. Pour ce qu'il est de la dernière question concernant la datation au ^{14}C , il est intéressant de souligner que les étudiant.e.s de master ont été les plus précis et corrects dans leur réponse. En effet, 80% des répondant.e.s ont utilisé d'emblée les concepts-en-acte de quantité de rayonnement et de temps de demi-vie pour justifier leur réponse, contre 67% pour les étudiant.e.s en agrégation dans le secondaire supérieur. Cela peut s'expliquer par la formation plus spécifique des étudiant.e.s en master en physique nucléaire.

5.2.3. Graphiques

Pour illustrer ces conclusions, nous présentons un graphique reprenant les différentes réponses obtenues en fonction du groupe de répondant.e.s. Nous avons mis en évidence le caractère naturel des processus radioactifs. Comme annoncé précédemment, on observe globalement un pourcentage élevé pour la réponse déclarative, signifiant qu'une grande partie des étudiant.e.s savent théoriquement que la radioactivité est naturelle. Ce pourcentage diminue lors des questions opératoires liées à l'uranium et au radon, montrant une appropriation limitée de ces concepts par les apprenant.e.s et donc, une présence de la préconception liée au caractère artificiel de la radioactivité.

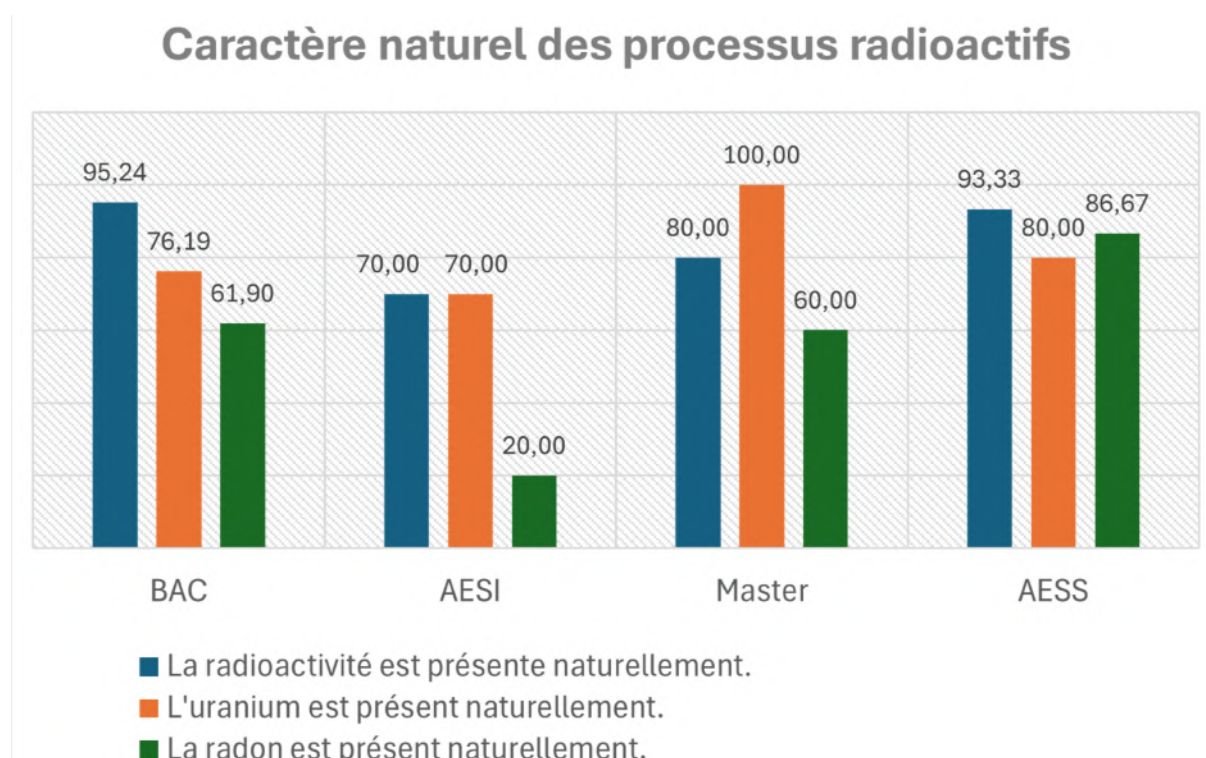


Figure 4 : La radioactivité est-elle un processus dangereux ? Source : Auteure

Ensuite, nous avons souhaité reprendre les différentes justifications amenées par les étudiant.e.s concernant l'utilisation du carbone 14. Notons que les deux seules justifications correctes sont : "rayonnement pas dangereux" et "faible quantité de rayonnement et temps de demi-vie long". On observe clairement une grande majorité de réponses correctes chez les étudiant.e.s de master. Ensuite, les répondant.e.s en AESS qui ont utilisé ces justifications à 67%, suivi des étudiant.e.s en bachelier. Finalement, chez les répondant.e.s de l'AESI, ces raisonnements sont peu présents et il est intéressant de noter l'abstention de la moitié des répondant.e.s. Cela peut s'expliquer par, malgré une bonne connaissance théorique, une difficulté d'utilisation de ces acquis dans des situations complexes.



Figure 5 : La radioactivité est-elle un processus dangereux ? Source : Auteure

5.3. La demi-vie

Nous poursuivons maintenant notre analyse avec les préconceptions en lien avec la demi-vie des éléments radioactifs. La question prédicative était formulée de la façon suivante : “Est-ce qu’un objet radioactif reste radioactif pour toujours ?” Les deux questions de type opératoire concret demandaient s’il était possible d’accélérer le processus de désintégration radioactif et d’identifier, à l’aide d’un graphique, le temps de demi-vie. La dernière question, du niveau opératoire abstrait, parlait de l’accident de Tchernobyl et du temps nécessaire pour que cette zone redevienne habitable. Grâce à cet enchaînement de questions, nous souhaitons mettre en évidence la compréhension des répondant.e.s à propos des concepts de demi-vie, de décroissance exponentielle et de taux de radiation.

5.3.1. Étudiant.e.s en bachelier

Chez les étudiant.e.s de bachelier, 89% des répondant.e.s ont affirmé qu’un élément radioactif ne restait pas radioactif à l’infini. La grande majorité de ces étudiant.e.s a répondu en utilisant les concepts-en-acte de demi-vie et de stabilité du noyau. Ces mêmes concepts-en-acte ont été utilisés par 76% des étudiant.e.s lorsqu’il leur est demandé de justifier le temps nécessaire pour qu’une zone redevienne habitable après l’accident de Tchernobyl. D’ailleurs, 19% de ces répondant.e.s ont également utilisé le concept-en-acte de la quantité de radioéléments émis lors de la catastrophe et formulé le théorème-en-acte suivant “Plus

des éléments radioactifs sont émis, plus le temps nécessaire pour que le taux de radiation revienne à la normale est important”. Ce raisonnement est tout à fait justifié mais ne suffit pas, à lui seul pour expliquer le taux de radiation. La notion de demi-vie est centrale. Toutefois, en analysant les réponses des questions suivantes, on se rend compte que cette notion n’est pas si bien comprise par tout.e.s les apprenant.e.s. Tout d’abord, un peu plus d’un tiers des répondant.e.s a répondu explicitement qu’elles/ils ne savaient pas s’il était possible d’accélérer la désintégration radioactive. Cela montre qu’après réflexion, les étudiant.e.s ne sont pas capables d’identifier le concept-en-acte de demi-vie comme étant pertinent lors d’une nouvelle situation-problème requérant une demande cognitive importante. De plus, seulement 33% des étudiant.e.s ont répondu, à juste titre, qu’il était impossible d’accélérer le processus de désintégration et, parmi ce groupe de répondant.e.s, seul 29% des étudiant.e.s ont utilisé le concept-en-acte de demi-vie dans cette situation. Cela montre que ce raisonnement est encore minoritaire chez les étudiant.e.s de bachelier.

5.3.2. Étudiant.e.s en AESI

Intéressons-nous maintenant aux étudiant.e.s en agrégation dans le secondaire inférieur. Seul.e un.e étudiant.e sur 10 a mis en évidence que le temps nécessaire pour qu’un élément radioactif redevienne stable dépendait de son temps de demi-vie. Cela montre que ce concept n’est, à priori, pas jugé comme pertinent par la plupart des répondant.e.s, même dans le cas de questions élémentaires dont le contexte exige l’utilisation de tels concepts. On peut pourtant inférer que certain.e.s des étudiant.e.s connaissent et maîtrisent cette notion car 40% des répondant.e.s ont pu, à l’aide d’un graphique, identifier correctement le temps de demi-vie. Toutefois, grâce à ce même graphique, nous pouvons mettre en évidence qu’aucun.e de ces mêmes étudiant.e.s ne maîtrisent le concept de décroissance radioactive exponentielle. En effet, après avoir identifié le temps de demi-vie qui est de 2 secondes, on demande aux étudiant.e.s d’expliquer ce qu’il se passe après 4 secondes. Plusieurs répondant.e.s ont décrit qu’après 4 secondes, il n’y aurait plus de désintégration, ce qui nous permet d’inférer l’utilisation du concept-en-acte de temps de demi-vie comme étant linéaire pour formuler le théorème-en-acte discuté précédemment “Si après un temps T un élément radioactif a disparu de moitié, après $2T$ l’élément radioactif se sera complètement désintégré”. C’est ce théorème-en-acte qui a été utilisé par les répondant.e.s et qui a guidé leur réponse. Les autres réponses confirment cette faible utilisation et appropriation par les étudiant.e.s des concepts en lien avec le temps de demi-vie. Par exemple, seulement 30% des répondant.e.s ont expliqué qu’il était impossible d’accélérer le processus de décroissance radioactive mais aucun.e n’a justifié cela à l’aide de la notion de temps de demi-vie. Ces conclusions peuvent s’expliquer par le décalage entre les connaissances déclaratives et opératoires. En effet, la mémorisation d’une définition ou même l’identification de cette définition en situation simple ne permet pas d’affirmer la maîtrise conceptuelle et la capacité

d'appliquer le concept en situation. Les étudiant.e.s qui ne savent que verbaliser la définition de temps de demi-vie ne sont pas toujours capables de mobiliser ce concept afin de réaliser une prédiction simple sur l'évolution temporelle des émissions radioactives. Il serait donc intéressant et essentiel d'insister sur ce point lors du processus de formation des nouvelles/nouveaux enseignant.e.s afin de leur permettre de dépasser ce niveau déclaratif et qu'elles/ils soient en capacité de réaliser un raisonnement opératoire.

5.3.3. Étudiant.e.s en master et en AESS

Nous terminons notre analyse sur la compréhension du concept de demi-vie avec les étudiant.e.s de master et d'agrégation dans l'enseignement secondaire supérieur. 50% des répondant.e.s en master et à l'AESS affirment qu'il est impossible d'accélérer la désintégration radioactive. C'est 20% de plus que chez les étudiant.e.s en bachelier. Cela montre une maîtrise plus complète des notions de temps de demi-vie et du processus de désintégration radioactive chez les étudiant.e.s ayant suivi un apprentissage plus long et poussé. C'est, en quelque sorte, une conclusion rassurante. De plus, 60% des étudiant.e.s de master et 93% des étudiant.e.s de l'AESS ont justifié le temps nécessaire pour que la zone entourant Tchernobyl redevienne habitable à l'aide du concept de temps de demi-vie. Il est intéressant de noter que, de manière générale, les répondant.e.s en master utilisaient un vocabulaire plus précis et rigoureux que les autres groupes de répondant.e.s. En effet, parmi les étudiant.e.s ayant utilisé le concept-en-acte de demi-vie dans le cas de Tchernobyl, 83% des étudiant.e.s en master ont explicitement cité ce concept, par rapport à 75% chez les étudiant.e.s en bachelier, 40% pour celles/ceux en AESI et 50% pour celles/ceux en AESS. Cela s'explique par leur parcours plus approfondi et rigoureux dans le domaine de la physique nucléaire. Les étudiant.e.s du 3^e groupe présentent également une meilleure compréhension du concept de désintégratif radioactive. En effet, l'entièreté des répondant.e.s de master a identifié correctement le comportement de la décroissance exponentielle après 4 secondes. En outre, elles/ils ont apporté une nuance supplémentaire lorsqu'il leur était demandé de justifier si un élément radioactif restait radioactif pour toujours. En effet, 60% des répondant.e.s ont affirmé que oui et ont justifié cela avec les concepts-en-acte d'asymptote et d'exponentielle décroissante. Elles/ils ont donc utilisé ces concepts mathématiques pour expliquer, qu'en théorie, le nombre de décroissance radioactive n'atteignait jamais 0. Toutefois, 67% d'entre elles/eux ont ajouté qu'en pratique, à partir d'un certain temps, ce taux de radiation devenait négligeable. Cela montre une bonne maîtrise des connaissances prédictives et explicatives des notions en lien avec le temps de demi-vie, chez ces étudiant.e.s.

5.3.4. Graphiques

Afin de clarifier cela, nous avons réalisé deux graphiques. Le premier a pour but de synthétiser les informations présentées dans le texte à propos de la question demandant s'il était possible d'accélérer le processus de désintégration. La réponse attendue était de dire qu'en vertu du temps de demi-vie qui est fixe pour chaque isotope radioactif, ce processus ne peut pas être accéléré. Environ 3 répondant.e.s sur 10 chez les étudiant.e.s en bachelier et à l'AESI ont répondu correctement et 5 répondant.e.s sur 10 pour les étudiant.e.s de master et de l'AESS. Grâce à ce graphique, on peut clairement voir les 40% d'abstention chez les étudiant.e.s en bachelier et à l'AESI, signe d'une hétérogénéité importante entre les répondant.e.s. Le deuxième graphique, quant à lui, met en lumière l'application des concepts-en-acte de temps de demi-vie et de décroissance radioactive, maîtrisés ou non par les différents groupes de répondant.e.s. On retrouve les conclusions précédentes, c'est-à-dire que 3/4 des étudiant.e.s de bachelier et de l'AESS maîtrisent les deux concepts et l'entièreté des étudiant.e.s de master également. Chez les étudiant.e.s de l'AESS, aucun.e ne maîtrise le concept de décroissance radioactive mais 40% arrivent à mettre en application la notion de demi-vie.

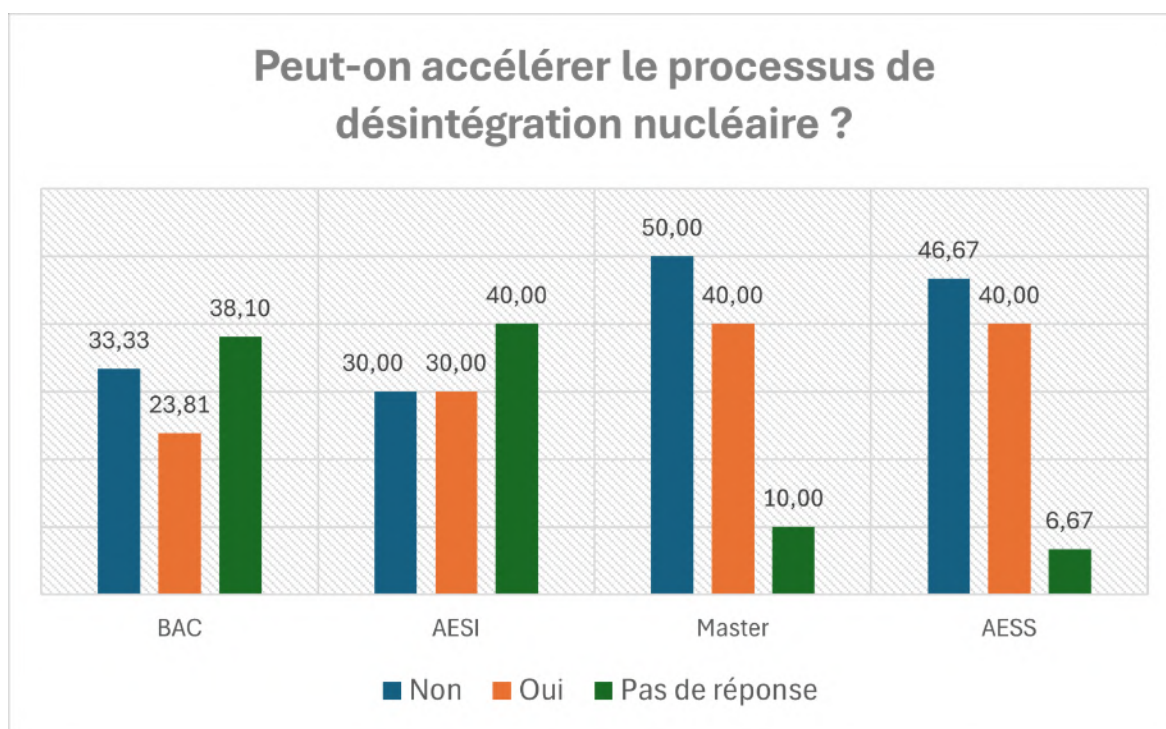


Figure 6 : Peut-on accélérer le processus de désintégration nucléaire ? Source : Auteure

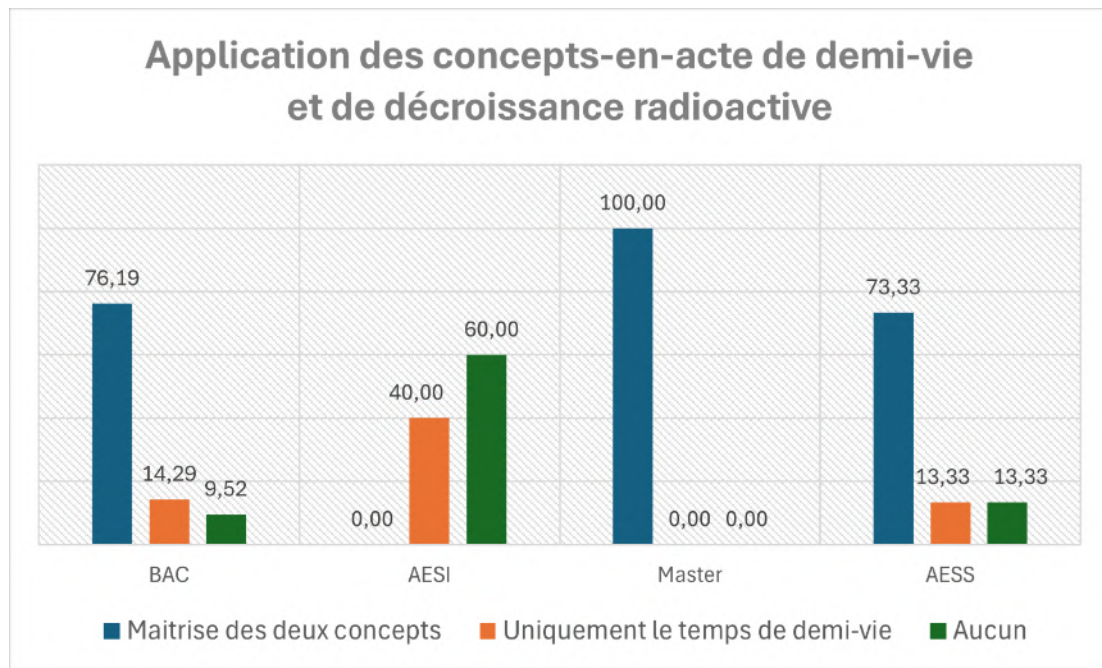


Figure 7 : Application des concepts-en-acte de demi-vie et de décroissance radioactive. Source : Auteure

5.4. Les rayonnements radioactifs

5.4.1. Étudiant.e.s en bachelier

Dans la suite, nous allons nous attarder sur les différents rayonnements radioactifs et la compréhension du concept d'émission alpha, beta et gamma. La question prédictive demandait aux étudiant.e.s d'expliquer ce qu'est le rayonnement radioactif. D'un côté, la moitié des étudiant.e.s en bachelier ont utilisé un concept-en-acte similaire à celui "d'émission" et ont expliqué qu'il s'agissait d'une émission, d'un rayon émis par le noyau d'un élément radioactif. De l'autre, 24% des étudiant.e.s ont justifié ce rayonnement par l'émission de particules. Seul 20% de ces répondant.e.s ont précisé qu'il pouvait s'agir de particules alpha, beta et gamma. Pourtant, 2/3 des étudiant.e.s en bachelier connaissent théoriquement ces rayonnements et justifient leur différence en disant qu'ils sont de natures différentes. En effet, lors de la question suivante, il est demandé d'expliquer la différence entre ces 3 rayonnements et 29% des répondant.e.s ont expliqué de quoi sont constitués ces rayonnements : le rayonnement alpha est formé de noyau d'hélium, le rayonnement beta est fait d'électrons et le rayonnement gamma est un faisceau de photons. Près de 40% des étudiant.e.s ont utilisé le concept-en-acte de "pouvoir de pénétration" pour les différencier. Nous avons souhaité mettre d'avantage ce concept en évidence lors des questions suivantes. Nous avons donc demandé aux étudiant.e.s si le fait de porter des gants était suffisant lors de la manipulation d'un élément radioactif. La réponse attendue était de dire que cela dépend du type de rayonnement émis. Nous avons retrouvé cette réponse chez 62% des

répondant.e.s et la moitié d'entre elles/eux ont ajouté que la protection était suffisante pour les rayonnements alpha et beta mais pas les rayonnements gamma. Parmi les autres étudiant.e.s ayant répondu que la protection n'était pas suffisante, on retrouve le concept-en-acte de propagation uniforme du rayonnement qui pousse les répondant.e.s à formuler un théorème-en-acte de la sorte "Comme le rayonnement va dans toutes les directions, il est nécessaire de protéger l'entièreté de son corps". Ce théorème-en-acte est vrai mais ne s'applique pas dans ce cas-ci car le concept-en-acte n'est pas pertinent dans cette situation. En effet, la peau permet d'arrêter les rayonnements alpha et une partie des rayonnements beta. Donc, le concept-en-acte pertinent dans ce cas est bien le pouvoir de pénétration des rayonnements dans la matière. Finalement, nous avons mis ce concept dans une situation-problème en demandant aux répondant.e.s ce qu'il était nécessaire de considérer lors de la construction d'un abri anti-nucléaire. Il est intéressant de souligner que nous avons reçu beaucoup de réponses variées disant qu'il fallait examiner la quantité de nourriture et d'eau nécessaire, fabriquer un système de ventilation efficace ou encore considérer les changements météorologiques. 29% des étudiant.e.s ont dit qu'il fallait prendre en considération l'épaisseur des murs pour, par exemple, "isoler des radiations". En résumé, 38% des répondant.e.s ont affirmé qu'une caractéristique des différents rayonnements était leur pénétration dans la matière. Toutefois, 10% de moins a été capable d'utiliser cette connaissance lors d'une nouvelle situation requérant une demande cognitive supplémentaire.

5.4.2. Étudiant.e.s en AESI

En ce qui concerne les étudiant.e.s de l'AESI, 40% d'entre elles/eux, ont expliqué les rayonnements radioactifs de la même manière que la majorité des étudiant.e.s en bachelier, c'est-à-dire, en utilisant la notion de rayon provenant du noyau. Cependant, un.e seul.e étudiant.e a expliqué qu'il existait différents rayonnements qui émettent des particules distinctes. La moitié des répondant.e.s n'ont pas répondu à la question, montrant un manque de connaissance important. En ce qui concerne les différences entre les rayonnements, 30% des répondant.e.s vont définir les types de rayonnement à l'aide des particules émises mais aucun.e ne va utiliser le concept-en-acte de pouvoir de pénétration dans la matière. Pourtant, lors de la question suivante, lorsqu'il est demandé de justifier si le port de gant est suffisant durant la manipulation d'un élément radioactif, 70% des étudiant.e.s vont mobiliser ce concept mais sans le citer directement. En effet, ces étudiant.e.s vont répondre que cela dépend du type de rayonnement ou du type de gant. Cette dernière justification peut paraître un peu étrange. De fait, pour protéger des rayonnements gamma, il est nécessaire d'avoir une épaisse couche de plomb ou de béton. On imagine donc difficilement la création de gants avec ces matériaux. Lors de la dernière question, portant sur la construction d'un abri anti-nucléaire, 20% des étudiant.e.s ont dit qu'il était nécessaire de considérer l'épaisseur des

murs. On remarque donc que les connaissances déclaratives limitées de ces étudiant.e.s ont été un frein pour répondre aux questions de type opératoire. Même si un nombre important d'étudiant.e.s utilise les concepts-en-acte pertinents, peu savent les citer explicitement et elles/ils les utilisent davantage de manière intuitive.

5.4.3. Étudiant.e.s en master

Pour ce qui est des étudiant.e.s en master, 60% des répondant.e.s ont expliqué le rayonnement en citant d'emblée les différents types de rayonnements et en évoquant leur composition. C'est 10 fois plus que pour les étudiant.e.s de bachelier et d'AESI combiné.e.s. De plus, 90% des étudiant.e.s de master ont expliqué que l'utilisation de gants contre les éléments radioactifs dépendait de l'élément en question et du type de radiations émises. Les résultats deviennent moins uniformes lors de la dernière question. En effet, seul.e.s 20% des étudiant.e.s ont utilisé le concept-en-acte de pouvoir de pénétration pour justifier la construction d'un abri anti-nucléaire en disant qu'il fallait tenir compte de l'épaisseur des murs. Toutefois, la moitié des autres répondant.e.s a utilisé une justification qui laisse penser à l'utilisation indirecte de ce concept. De fait, elles/ils ont écrit qu'il était nécessaire de construire l'abri à une profondeur suffisante sous terre. Même si, dans ce cas-ci, le théorème-en-acte utilisé n'est pas " Pour se protéger des rayonnements pénétrants, il est nécessaire de considérer une couche importante de béton/plomb. " mais plutôt : " Pour se protéger des rayonnements pénétrants, il est nécessaire de considérer un enfouissement important sous terre. ", ces deux théorèmes prennent naissance dans le concept-en-acte lié à la pénétration des rayonnements dans la matière. Finalement, nous observons globalement une très bonne compréhension des connaissances déclaratives et une utilisation judicieuse de ces dernières lors de situations plus complexes.

5.4.4. Étudiant.e.s en AESS

Terminons avec les étudiant.e.s de l'AESS, l'agrégation pour l'enseignement secondaire supérieur. Un peu plus de la moitié d'entre elles/eux ont expliqué que le rayonnement radioactif était une émission produite par un élément radioactif. Bien que cette réponse soit correcte, elle est très rudimentaire. 40% des étudiant.e.s ont, quant à elles/eux expliqué qu'il s'agissait de particules émises, et la moitié parmi ces répondant.e.s ont précisé qu'il existait différents types de rayonnements : alpha, beta et gamma. Par la suite, quand il s'agit de différencier ces rayonnements, 47% des répondant.e.s ont expliqué qu'ils étaient de nature différente. La plupart d'entre elles/eux ont distingué ces rayonnements en faisant appel aux différentes particules émises : noyau d'hélium, électrons ou photons. Il est intéressant de noter que le reste des répondant.e.s, soit 53%, n'a pas répondu à cette question ou a

explicitement écrit qu'elles/ils ne savaient pas. Aucun autre groupe n'a un taux d'abstention si élevé. Encore une fois, cela peut s'expliquer par la grande diversité des profils des étudiant.e.s suivant l'agrégation. En ce qui concerne les protections nécessaires pour manipuler une source radioactive, 2/3 des répondant.e.s ont noté que le port de gants n'était pas suffisant pour s'en protéger. Certain.e.s ont nuancé leur propos en différenciant les types de rayonnements. Une réponse qui est apparue chez 20% de ces répondant.e.s est de dire que la transmission n'était pas uniquement au toucher et que donc, les gants ne pouvaient pas nous en protéger. En effet, la contamination avec un rayonnement peut se faire par ingestion. Mais dans le contexte de la question, lorsqu'il s'agit de manipuler une source radioactive, ce concept-en-acte n'est pas pertinent. Finalement, 40% des étudiant.e.s ont spécifié que lors de la fabrication d'un abri anti-nucléaire, il était nécessaire de considérer l'épaisseur des murs. Il s'agit d'un taux élevé, comparativement aux groupes d'étudiant.e.s de bachelier et d'AESI.

Afin de résumer cela, nous présentons ci-dessous un extrait d'un questionnaire provenant des étudiant.e.s de l'AESS par rapport aux concepts touchant les différents types de rayonnements. Afin de ne pas induire un biais lié à l'ordre des questions, nous en avons modifié l'arrangement. Nous avons commencé par poser la question requérant une demande cognitive plus importante, portant sur la construction de l'abri anti-nucléaire, puis les deux questions explicatives et finalement la question déclarative, demandant ce qu'est un rayonnement radioactif.

- **Imaginons que l'on veuille construire un abri anti-nucléaire. Que doit-on prendre en considération ?**

Epaisseur des murs et matériaux (plomb) susceptibles d'arrêter les radiations.

- **Qu'elles sont les différences entre les 3 types de rayonnement : alpha, beta et gamma ?**

Je ne sais pas bien. (Voir Wikipédia :).

- **Porter des gants lors d'une manipulation avec des éléments radioactifs, est-ce une protection suffisante ? Détaillez votre raisonnement.**

Non. Les radiations vont dans tous les sens.

- **Qu'est-ce que le rayonnement radioactif ?**

Emission de particules.

Dans cet enchaînement de questions, nous remarquons la présence de plusieurs éléments exposés précédemment. Tout d'abord, lors de la question déclarative, c'est-à-dire la dernière question ici, l'étudiant.e répond qu'un rayonnement radioactif est une émission de particules. Ce n'est pas faux en soit, mais c'est un raisonnement très limité. Cela s'explique en analysant la deuxième question. En effet, l'étudiant.e ne sait pas qu'elles sont les différences entre les types de rayonnements. Cela montre un manque de connaissances théoriques globales et cela va restreindre son raisonnement. De fait, lors de la question opératoire abstraite, la première question, la/le répondant.e explique qu'il est nécessaire de considérer des murs épais et faits de certains matériaux comme le plomb afin d'arrêter les radiations. Ce raisonnement pourrait faire croire que l'étudiant.e maîtrise le concept-en-acte de pouvoir de pénétration des rayonnements dans la matière mais qu'il ne l'a simplement pas mentionné précédemment. Néanmoins, si l'on se penche sur la 3^e question (concernant le port de gant), la/le répondant.e n'utilise pas du tout ce concept-en-acte pour répondre. Cela nous permet donc de conclure que la/le répondant.e ne maîtrise pas ou peu ce concept car son utilisation reste occasionnelle. En effet, il n'intervient que dans une situation sur les 3 possibles (différence entre les rayonnements, port de gants et abri anti-nucléaire). À la place, la/le répondant.e utilise un théorème-en-acte déjà discuté précédemment en lien avec la propagation uniforme du rayonnement : "Comme le rayonnement va dans toutes les directions, il est nécessaire de protéger l'entièreté de son corps". Nous pouvons donc finalement en déduire que l'étudiant.e possède une connaissance limitée des concepts théoriques et que cela a un impact sur l'ensemble des inférences qu'elle/il peut développer par la suite. Cela renforce l'idée qu'une connaissance théorique minimum est nécessaire afin de permettre aux étudiant.e.s d'utiliser ces savoirs dans le cadre de nouvelles situations-problèmes.

5.4.5. Graphiques

Comme précédemment, nous clôturons cette section avec quelques graphiques synthétisant les discussions ci-dessus. Tout d'abord, nous avons représenté les différents arguments avancés par les étudiant.e.s suite à la question déclarative "Qu'est-ce que le rayonnement radioactif ?" Nous pouvons observer qu'une partie importante, voire la moitié des répondant.e.s en bachelier, à l'AESI et à l'AESS a utilisé les concepts-en-acte liés à l'émission ou au rayonnement provenant d'un noyau radioactif. Ce raisonnement correct est toutefois très limité. Chez les étudiant.e.s de master, elles/ils ont principalement justifié cela par l'émission de différentes particules alpha, beta et gamma. Notons que nous avons fait la distinction avec les réponses contenant ou pas cette distinction. Cela permet de mettre en évidence que cette séparation est minoritaire dans le raisonnement des étudiant.e.s de bachelier et de l'AESI. On observe également l'abstention de la majorité des répondant.e.s de l'AESI, signe d'une maîtrise insuffisante des concepts théoriques.



Figure 8 : Qu'est-ce que le rayonnement radioactif ? Source : Auteure

Nous avons ensuite réalisé un graphique reprenant les différentes réponses données concernant le port de gants lors de la manipulation d'un élément radioactif. Nous remarquons que les étudiant.e.s de bachelier, de l'AESI et de master justifient davantage leur réponse en fonction du type de rayonnement, de l'élément radioactif et même, du type de gants utilisés.

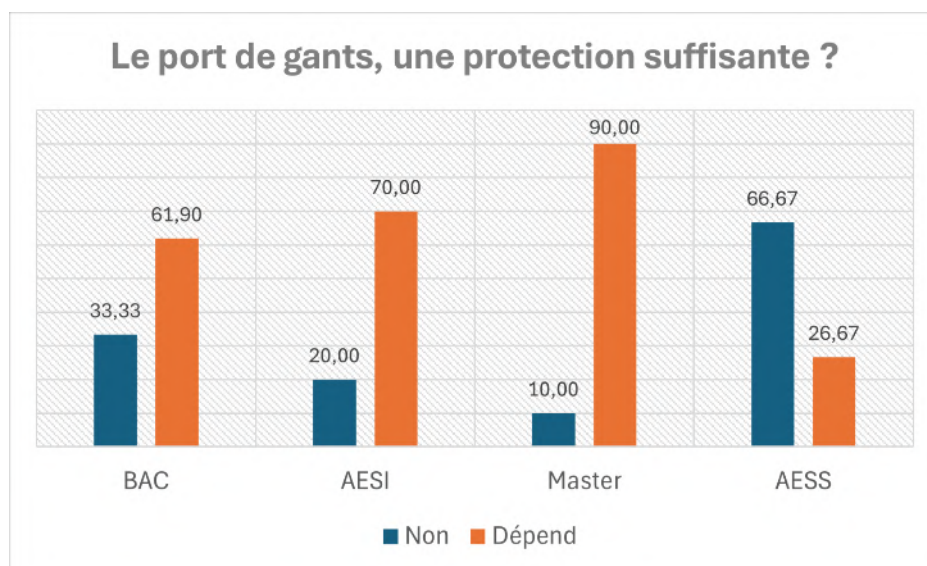


Figure 9 : Le port de gants, une protection suffisante ? Source : Auteure

Finalement, le dernier histogramme regroupe les 3 questions faisant intervenir le concept-en-acte de pouvoir de pénétration. En effet, les répondant.e.s pouvaient y faire appel pour justifier la différence entre les 3 types de rayonnement, pour justifier le port de gants lors d'une source radioactive et pour expliquer les précautions à prendre lors de la construction d'un abri anti-nucléaire. Nous constatons que les étudiant.e.s de bachelier sont celles/ceux qui ont utilisé le plus ce concept pour faire la distinction entre les rayonnements. Les répondant.e.s en master ont été celles/ceux qui ont utilisé le plus ce concept-en-acte pour les deux autres questions. Nous remarquons une baisse importante pour les étudiant.e.s de l'AESS et cela peut s'expliquer par le caractère plus technique de ce concept et la variété d'étudiant.e.s suivant l'agrégation. Cela confirme sur la nécessité de donner à ces futur.e.s enseignant.e.s une formation disciplinaire détaillée et, entre autres, dans les thématiques liées à la physique nucléaire.

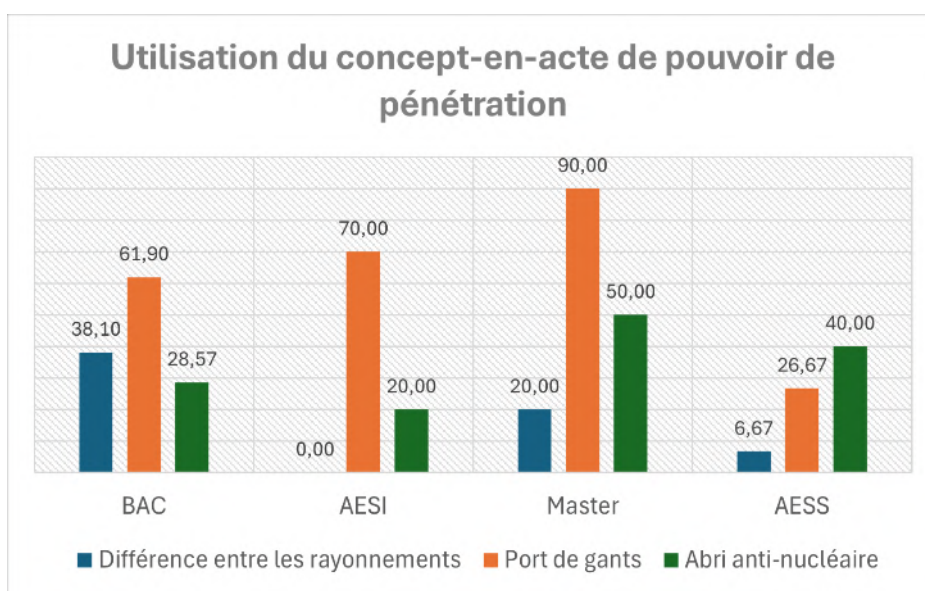


Figure 10 : Utilisation du concept-en-acte de pouvoir de pénétration. Source : Auteure

5.5. La production d'énergie

5.5.1. Étudiant.e.s en bachelier

Considérons maintenant les préconceptions en lien avec la production d'énergie. Concernant cette thématique, la première question posée aux répondant.e.s permet de voir l'étendue des connaissances théoriques des étudiant.e.s. En effet, il leur est demandé d'expliquer d'où provient l'énergie émise lors d'une réaction nucléaire. Les étudiant.e.s de bachelier ont, à 52%, répondu que cela provenait de la fission ou de la fusion nucléaire. Parmi ces répondant.e.s, seul.e.s 1/3 ont explicité davantage en développant un raisonnement plus avancé. Plusieurs concepts et théorèmes-en-acte ont été utilisés. Un.e étudiant.e a justifié cela en disant que les deux noyaux produits lors de la fission sont plus petits et donc moins

énergétiques ; il y a donc une émission d'énergie lors de la fission. Les concepts-en-acte utilisés ici sont la taille du noyau et l'énergie contenue dans le noyau. Elle/il a formulé un théorème-en-acte pouvant être résumé ainsi : "Plus un noyau est grand, plus il est énergétique." ; ce qui explique sa réponse incorrecte. Ce raisonnement ne permettrait pas à l'étudiant.e d'expliquer la libération d'énergie lors de la fusion nucléaire. En effet, elle/il devrait arriver à la conclusion que la fusion demande de l'énergie car le noyau formé est plus énergétique que les noyaux initiaux et que donc, au lieu d'une libération d'énergie, la fusion s'accompagne d'une absorption d'énergie. Toutefois, en analysant les questions suivantes, on se rend compte que cette/ce répondant.e contourne le problème en disant que la libération d'énergie lors des processus de fission et fusion est due à une modification de l'interaction forte. Elle/il n'est donc pas consistant.e dans ses raisonnements, ce qui peut signifier une maîtrise partielle des concepts. Une autre explication, donnée par 14% des répondant.e.s, s'appuie sur l'émission de particules. Toutefois, elles/ils ne justifient pas cela avec les mêmes particules. Pour certain.e.s, il s'agit de neutrons et d'électrons et pour d'autres de photons. Même s'il est vrai de dire qu'il y a libération de neutrons et de photons, ces particules ne sont pas responsables de la majorité de l'énergie émise lors d'une réaction de fission comme dans les centrales nucléaires. Dans ce cas-ci, le concept-en-acte utilisé, qui est "l'émission de particules", n'est pas pertinent. Grâce à ces deux exemples, on voit bien la Théorie des Champs Conceptuels "en action". Dans le premier cas, le concept-en-acte de contenu énergétique des noyaux est pertinent, mais il a entamé la construction d'un théorème-en-acte faux : "le contenu énergétique dépend de la taille de chaque noyau". Dans le deuxième exemple, cependant, le concept-en-acte pas pertinent d'émission radioactive a entamé la construction d'un théorème-en-acte vrai : "les émissions radioactives retirent l'énergie du noyau". Dans les deux cas, la résolution n'est pas correcte, mais les raisons (et les actions didactiques) sont différentes. D'un côté, il s'agit du théorème-en-acte qui fait défaut, alors que de l'autre, c'est le concept-en-acte qui n'est pas pertinent.

Il est intéressant de souligner que nous avons obtenu une variété importante de réponses, témoignant d'une grande disparité dans la maîtrise de ces concepts par les répondant.e.s. Cela peut s'expliquer par le fait que les étudiant.e.s de bachelier ont, pour la plupart, terminé leurs années de secondaire il y a moins de 5 ans et que les notions de physique nucléaire, normalement abordées en dernière année du secondaire, ne sont pas toujours vues, par manque de temps. En effet, de nombreux enseignant.e.s font le choix de mettre de côté ce chapitre au profit d'autres thématiques. Cela peut donc expliquer cette hétérogénéité soulevée dans l'analyse des réponses. Dans la question suivante, il est demandé aux étudiant.e.s d'expliquer l'équation $E = mc^2$. 43% des répondant.e.s ont simplement traduit l'équation mathématique en français, avec des phrases comme "L'énergie est la masse fois la célérité au carré". Parmi l'autre moitié des répondant.e.s, 83% des étudiant.e.s ont utilisé un théorème-en-acte comme "La masse et l'énergie sont liées". Cela montre une compréhension limitée des concepts en lien avec la production d'énergie comme le défaut de masse ou les

liaisons entre nucléons. Dans la dernière question, celle de type opératoire abstrait dans laquelle un jugement sur les concepts en application est sollicité, il est demandé aux étudiant.e.s si les centrales nucléaires sont une solution face à l'enjeu climatique actuel. 67% des répondant.e.s ont répondu avec l'affirmative et 79% d'entre elles/eux ont justifié leur choix avec la faible production de pollution et de gaz à effet de serre. 36% des répondant.e.s ayant répondu favorablement ont tout de même nuancé leur propos en citant le problème des déchets nucléaires. Si l'on regarde les réponses de manière générale, sans considérer une position plutôt qu'une autre, on observe que 81% des répondant.e.s ont cité au minimum 2 éléments de raisonnement. Par "élément de raisonnement", nous entendons ici un argument en faveur de la thèse défendue ou, à l'inverse, un point d'attention soulevé permettant de nuancer la position. 1/3 parmi ces étudiant.e.s ont, par ailleurs, soulevé 3 éléments de réflexion ou plus. On peut donc en conclure que, de manière générale, le niveau de connaissance des répondant.e.s est suffisant pour leur permettre d'inférer un raisonnement situé face à une situation-problème concrète et actuelle et d'argumenter ainsi que de nuancer leur position en prenant en considération plusieurs paramètres. Il s'agit, dans le fond, du but du cours de sciences dans le secondaire ; donner aux élèves les clefs pour comprendre et poser un raisonnement éclairé dans une situation actuelle.

5.5.2. Étudiant.e.s en AESI

Pour ce qui est des étudiant.e.s de l'AESI, 70% des répondant.e.s ont justifié la provenance de l'énergie émise lors d'une réaction nucléaire par la fission nucléaire. Une autre question posée est de savoir s'il faut rajouter de la matière première dans le réacteur d'une centrale nucléaire ou si tout l'uranium était placé avant le démarrage de la centrale. Uniquement 30% des répondants ont dit qu'il fallait ajouter de la matière première. De plus, seul.e un.e étudiant.e a expliqué son interprétation de l'équation mathématique $E = mc^2$. Sa justification est très complète car elle fait intervenir, sans le citer, le concept-en-acte de défaut de masse. Si l'on considère la dernière question portant sur le changement climatique, 40% des étudiant.e.s ont justifié leur position à l'aide de 2 éléments de réflexion et aucun.e n'en a utilisé davantage. Il s'agit donc, dans la plupart des cas, d'un raisonnement direct, prenant peu en compte différents paramètres. On peut expliquer ces conclusions de la même façon que pour les préconceptions en lien avec le temps de demi-vie. En effet, une réponse correcte pour les questions déclaratives ne garantit pas la compréhension des concepts par les répondant.e.s. Il serait important de former d'avantage ces étudiant.e.s à l'utilisation de ces concepts dans des situations plus complexes lors de l'agrégation.

5.5.3. Étudiant.e.s en master

Dans le cas des étudiant.e.s en master, 70% des répondant.e.s ont avancé que l'énergie émise lors d'une réaction nucléaire provient de la modification ou de la libération de l'énergie de liaison et du défaut de masse. Cette justification, tout à fait correcte, était peu apparue dans les réponses du groupe précédent et uniquement chez 29% des répondant.e.s en bachelier. Chez les étudiant.e.s de l'AESS, 20% des répondant.e.s ont utilisé ce concept-en-acte mais sans le citer explicitement. Cela montre, encore une fois, une maîtrise avancée des concepts théoriques chez les étudiant.e.s de master. Cela se confirme avec la question en lien avec l'équation $E = mc^2$. 80% des répondant.e.s ont formulé un raisonnement pour interpréter cette équation ; c'est 30% de plus que chez les étudiant.e.s de bachelier. La justification se base principalement sur le lien entre la masse et l'énergie. Pour terminer, 70% des répondant.e.s considèrent que le nucléaire est une solution face à l'enjeu climatique et l'entièreté des réponses étaient argumentées avec un minimum de 2 éléments de réflexion. En outre, 70% des répondant.e.s ont utilisé 3 éléments de réflexion ou plus. Cela montre, qu'en plus d'une maîtrise poussée des connaissances prédictives, les étudiant.e.s sont davantage amené.e.s à produire une réflexion argumentée et nuancée face à des questions de type opératoire abstrait.

Pour illustrer ce propos, nous présentons ici un enchaînement de réponses produites par un.e répondant.e de master.

- **D'où provient l'énergie émise lors d'une réaction nucléaire ?**

Un élément instable a trop d'énergie que pour rester dans son état actuel. Il émet donc des particules en se dissociant et on libère l'énergie de liaison initialement donnée dans l'atome.

- **Pour faire fonctionner une centrale nucléaire, faut-il ajouter régulièrement de la matière première ou est-ce que l'entièreté de la matière première est placée dans la cuve du réacteur lors de sa fabrication ?**

Les bâtonnets d'uranium sont changés lorsqu'ils ont été "utilisés" (on l'espère) complètement. Il y a également de l'eau, qui permet au refroidissement qui est en circulation, qui doit être renouvelée (d'où les centrales sont proches de cours d'eau).

- **En 1905, A. Einstein publia un article contenant l'équation $E = mc^2$. Que veut dire cette équation ?**

Que l'énergie vaut la masse d'une particule multipliée par la vitesse de la lumière au carré (lorsque la particule est au repos). Cela appuie sur le fait que la masse est en fait une forme d'énergie.

- **L'utilisation des centrales nucléaires est-elle une solution face à l'enjeu climatique actuel ? Détaillez votre raisonnement.**

Les centrales nucléaires ne rejettent que de la vapeur d'eau contrairement à du charbon ou du pétrole (par exemple) qui rejettent du CO₂, on pourrait donc dire oui dans ce sens. Cependant, on doit accentuer avec le fait que les ressources utilisées ne sont pas recyclables (déchets nucléaires). Cela implique que ce n'est pas une énergie renouvelable. Cela ne rentre pas vraiment dans les idéaux d'utilisation d'énergies vertes pour la planète.

Dans cet extrait, on observe les différents points soulevés précédemment. Tout d'abord, pour répondre à la question concernant l'émission d'énergie lors d'une réaction nucléaire, la/le répondant.e a utilisé différents concepts-en-acte pertinents tels que la stabilité des éléments radioactifs, la libération d'un rayonnement et l'énergie de liaison. À l'aide de ces concepts, l'étudiant.e a formulé des théorèmes-en-acte permettant de répondre à la question. Les théorèmes-en-acte possibles sont : "Les éléments instables doivent se dissocier pour se stabiliser.", "La fission d'un isotope radioactif produit un rayonnement." et "Lors de la fission, l'énergie de liaison est libérée". Notons que cette explication ne tient compte que du processus de fission nucléaire et que la/le répondant.e ne tient pas compte de la fusion possible. Ces mêmes théorèmes-en-acte sont utilisés dans la question suivante pour justifier l'ajout de barre d'uranium, lorsque celui-ci est désintégré. Ensuite, pour la question concernant l'équation $E = mc^2$, l'étudiant.e a expliqué la formule en français puis a utilisé le concept-en-acte de conversion de masse et d'énergie. Finalement, l'étudiant.e a répondu à la question concernant le dérèglement climatique en utilisant 4 différents éléments de réflexion qui peuvent être formulés sous forme de concepts-en-acte ; l'absence de production de CO₂, la comparaison avec les centrales à charbon ou au pétrole, le problème des déchets nucléaires et le fait qu'il ne s'agit pas d'une énergie renouvelable. Grâce à cela, l'étudiant.e, malgré le fait qu'elle./il se soit, en un sens, positionné.e en faveur du nucléaire, a pu nuancer son propos en soulevant différents points cruciaux dans ce débat. Ces différents éléments de réflexion ont permis à la/au répondant.e de construire un raisonnement situé et nuancé, prenant en compte plusieurs paramètres pouvant se contredire. On observe donc ici un enchaînement de questions qui a permis de mettre en lumière que la bonne maîtrise des connaissances déclaratives par l'apprenant.e lui a permis d'inférer des raisonnements plus complexes, faisant intervenir plusieurs concepts-en-acte et de porter un regard critique et personnel et sur les situations-problèmes.

5.5.4. Étudiant.e.s en AEES

Concernant les étudiant.e.s de l'AEES, 60% des répondant.e.s ont justifié l'émission d'énergie lors d'une réaction nucléaire à l'aide des processus de fission et/ou fusion nucléaires. 33% des répondant.e.s ont utilisé le concept-en-acte d'énergie de liaison mais seulement un.e étudiant.e l'a explicitement cité. De plus, la moitié des répondant.e.s a formulé une interprétation de l'équation $E = mc^2$. La grande majorité des réponses utilisait le même concept-en-acte qu'identifié dans les autres groupes de répondant.e.s ; la conversion entre masse et énergie. Il est intéressant de souligner que 27% des étudiant.e.s n'ont pas répondu à cette question alors qu'aucune abstention n'a été observée chez les étudiant.e.s en bachelier et en master. Cela peut, encore une fois, s'expliquer par la différence de parcours académiques et professionnels des étudiant.e.s de l'AEES. Pour terminer, 53% des répondant.e.s ont utilisé au moins 2 éléments de réflexion lors de la question concernant de l'enjeu climatique. Parmi elles/eux, 75% ont formulé un argumentaire contenant 3 éléments ou plus permettant d'étayer leur propos. C'est plus que les étudiant.e.s de l'AESI, mais moins que celles/ceux en bachelier et en master. On peut donc en conclure qu'une bonne compréhension des concepts de base est essentielle pour produire une réflexion complexe et argumentée. Cela met en lumière encore une fois l'importance d'une formation poussée pour les futur.e.s enseignant.e.s en sciences.

5.5.5. Graphiques

Pour terminer cette analyse, nous proposons quelques graphiques afin de synthétiser nos résultats. Nous allons d'abord nous attarder sur la première question portant sur l'origine de la production d'énergie lors d'une réaction nucléaire. Comme annoncé, nous observons une majorité de réponses en lien avec la fission et la fusion nucléaire chez les étudiant.e.s en bachelier, de l'AESI et de l'AEES. Seul.e.s les répondant.e.s en master n'ont pas utilisé ce raisonnement en priorité mais se sont plutôt basés sur l'utilisation des concepts-en-acte "d'énergie de liaison" et "de défaut de masse". Cette justification est aussi présente chez les étudiant.e.s de l'AEES et de bachelier, et dans une moindre mesure, chez les étudiant.e.s de l'AESI. Nous observons également la présence du concept-en-acte en lien avec la libération de particules chez les répondant.e.s de bachelier et de master. Comme discuté précédemment, ce concept-en-acte n'est pas pertinent dans cette situation, malgré le fait qu'il permette la formulation d'un théorème-en-acte vrai.

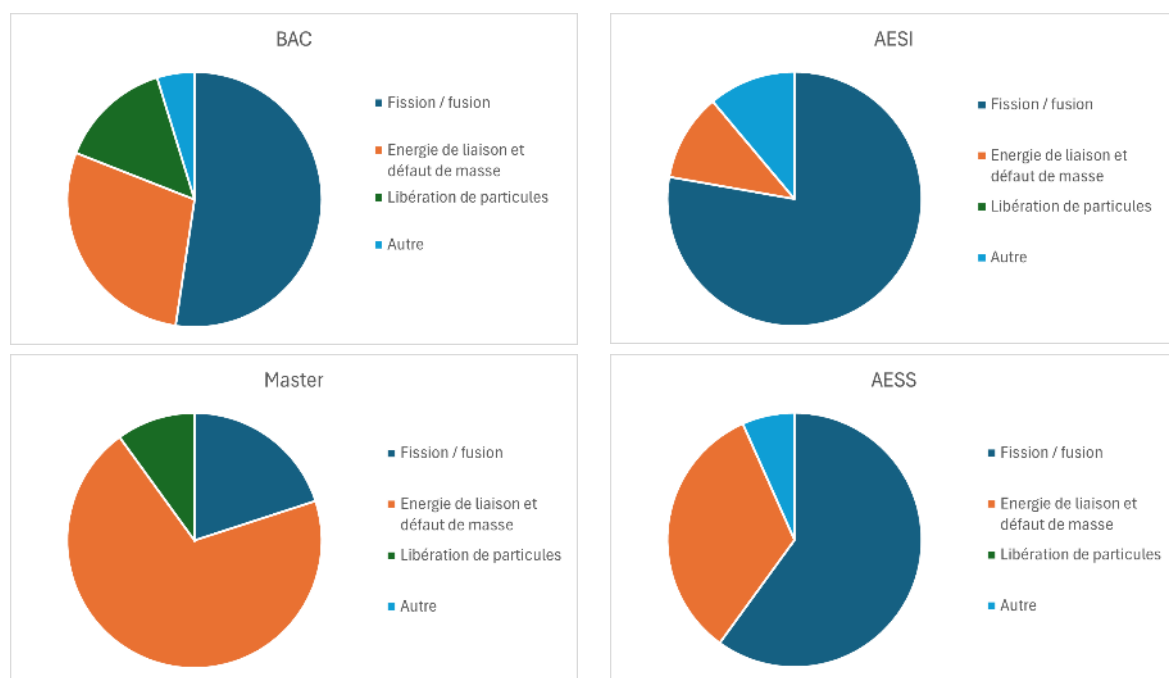


Figure 11 : D'où provient l'énergie produite lors d'une réaction nucléaire ? Source : Auteure

Nous allons ensuite analyser un graphique reprenant l'interprétation de l'équation $E = mc^2$ par les étudiant.e.s des différents groupes. On retrouve une grosse proportion de répondant.e.s en bachelier et à l'AESI ayant uniquement explicité en français l'expression mathématique. On peut également remarquer que 80% des étudiant.e.s de master ont expliqué cette équation, à juste titre, avec le concept-en-acte : "L'énergie et la masse sont liées". Près de 47% des étudiant.e.s en bachelier et à l'AEES ont également utilisé ce concept-en-acte. Notons qu'une partie significative des étudiant.e.s de l'AESI n'ont pas répondu ou ont utilisé un autre raisonnement.

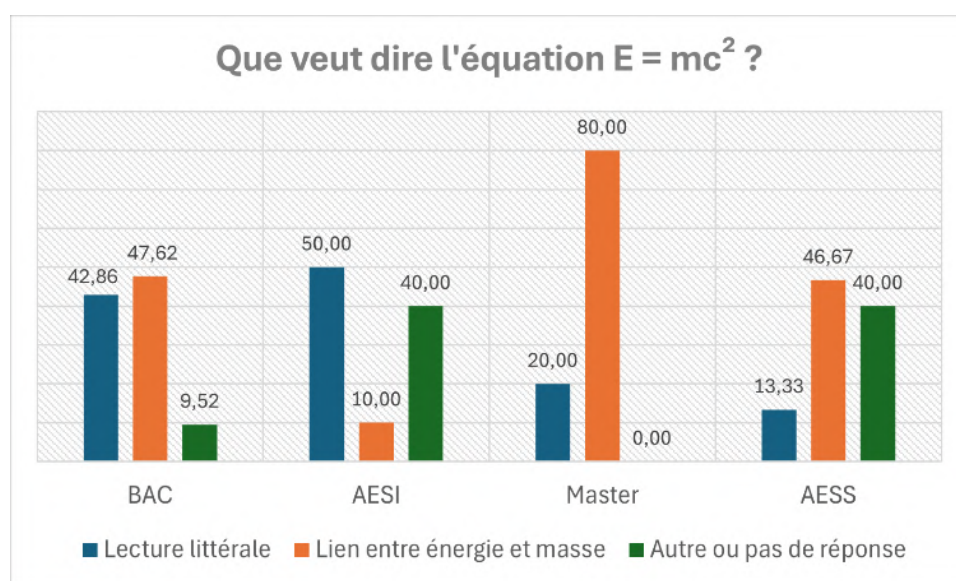


Figure 12 : Que veut dire l'équation $E = mc^2$? Source : Auteure

Finalement, nous terminerons cette analyse avec un graphique reprenant le nombre d'éléments de raisonnement utilisés par les étudiant.e.s pour justifier leurs réponses sur l'utilisation des centrales nucléaires comme solution face aux enjeux climatiques actuels. Nous observons une prédominance d'aucun ou de 1 élément chez les étudiant.e.s de l'AESI et de l'AESS, signe d'un manque de formation. En effet, sans connaissances théoriques de base, il est impossible d'inférer un raisonnement argumenté et nuancé face à une nouvelle situation-problème. Plus particulièrement, chez les étudiant.e.s de l'AESS, nous pouvons constater l'utilisation, à 40%, de 3 ou plus éléments. Cela montre des réponses très polarisées, avec d'un côté, des étudiant.e.s argumentant peu ou pas leur point de vue et, de l'autre, des étudiant.e.s étayant leur propos à l'aide de 3 ou plus éléments. Cette disparité importante peut s'expliquer, encore une fois, par la variété de parcours académiques et professionnels des étudiant.e.s inscrit.e.s à l'agrégation. Chez les répondant.e.s en bachelier, nous constatons une prédominance de 2 éléments de raisonnement et les étudiant.e.s en master ont, pour la grande majorité, utilisé 3 ou plus éléments de réponse. Cela montre le lien entre la maîtrise des concepts théoriques de base et la capacité d'inférer un raisonnement logique et situé lors d'une nouvelle situation.

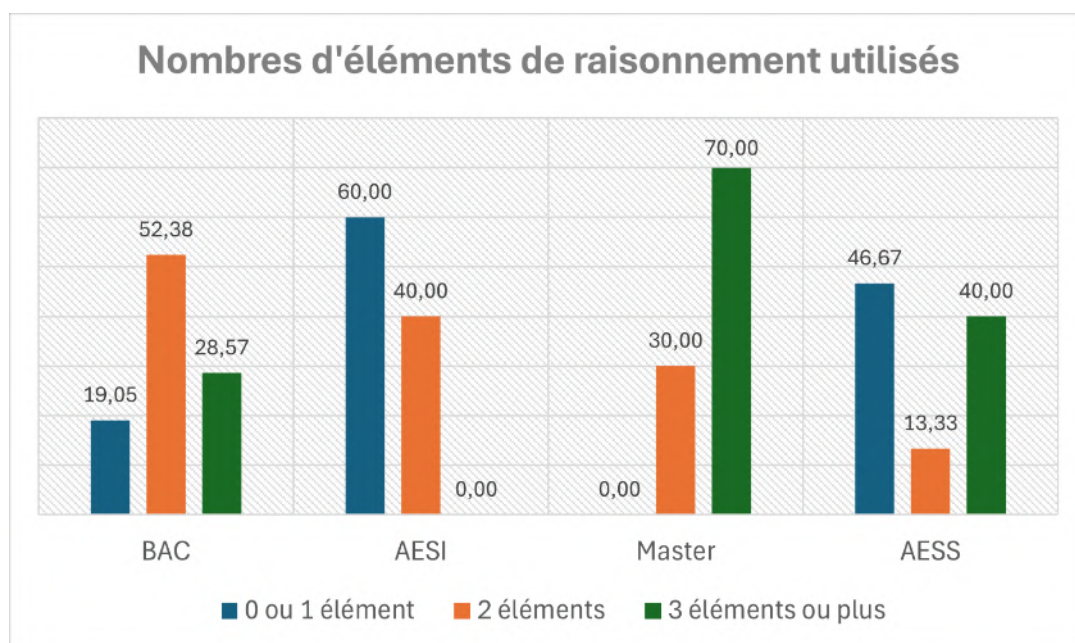


Figure 13 : Nombres d'éléments de raisonnement utilisés. Source : Auteure

5.6. La fission/fusion nucléaire

Finalement, pour clore ce chapitre, nous allons nous attarder sur les préconceptions qui entourent les processus de fission et fusion nucléaires. Pour ce faire, nous avons demandé aux répondant.e.s lequel de ces deux processus avait lieu dans les centrales nucléaires. Cette première question simple a pour but d'évaluer les connaissances de base de la/du

répondant.e. Ensuite, pour les questions explicatives, nous avons demandé aux étudiant.e.s si la libération d'énergie suite à la séparation de deux noyaux et suite à la combinaison de deux noyaux n'était pas une contradiction. Cette question a pour objectif d'inciter les étudiant.e.s à préciser davantage leur raisonnement et ainsi de voir si elles/ils sont capables d'appliquer leurs connaissances pour expliquer cette non-contradiction. Cette question peut permettre également de faire le lien avec les questions précédentes qui portaient sur l'équation $E = mc^2$. Afin de juger la cohérence des réponses données, la seconde question porte sur le processus à privilégier en présence d'un noyau lourd. Pour terminer, la dernière question, de type opératoire abstrait, demandait aux répondant.e.s d'expliquer comment la fission nucléaire réchauffe la Terre de l'intérieur et la fusion, de l'extérieur. Cette dernière question, clôturant le questionnaire, demandait une réflexion cognitive plus importante. Il était attendu que les répondant.e.s mobilisent leurs connaissances et répondent qu'il existe de la fission nucléaire dans la croûte et le manteau de la Terre et de la fusion dans le noyau du Soleil.

5.6.1. Étudiant.e.s en bachelier et en AESI

Concernant les étudiant.e.s de bachelier, 90% ont répondu qu'il s'agissait bien du processus de fission qui est en jeu dans les centrales nucléaires. De plus, 32% de ces répondant.e.s ont été plus loin en expliquant que la fusion nucléaire était en cours de développement. Ce très bon résultat est appuyé par la question portant sur le processus à privilégier dans le cas d'un noyau lourd. En effet, 86% des répondant.e.s ont noté qu'il était préférable de réaliser de la fission. Cela montre une bonne compréhension car il ne s'agit pas d'un "coup de bluff" de la part des étudiant.e.s. De fait, elles/ils ont utilisé leurs connaissances pour inférer correctement le processus à favoriser pour un noyau lourd. Dans les réponses suivantes, qui questionnent la potentielle contradiction entre la fission et fusion, les arguments sont très différents. 1/4 des répondant.e.s ont justifié cela avec le concept-en-acte de défaut de masse mais sans le citer explicitement. Les expressions utilisées par les étudiant.e.s sont "variation de masse", "changement de masse" ou "perte de masse". 24% des répondant.e.s ont utilisé, quant à elles/eux, un concept-en-acte lié à la libération de l'énergie ou à la stabilité des éléments radioactifs. Ces trois concepts-en-acte sont, dans les faits, regroupés par l'équation $E = mc^2$, traitée précédemment. Dans la dernière question au sujet des processus naturels de fission et fusion, 38% des répondant.e.s ont utilisé le raisonnement correct présenté précédemment et 29% des étudiant.e.s ont justifié un phénomène sur les deux présentés.

Attardons-nous maintenant sur les étudiant.e.s de l'AESI. 90% de ces dernier.ère.s ont répondu correctement concernant le processus nucléaire présent dans les centrales nucléaires, c'est autant que les étudiant.e.s de bachelier. Toutefois, seule la moitié des répondant.e.s a utilisé correctement leurs connaissances pour expliquer l'utilisation de la

fission lors d'un noyau radioactif lourd. Cela montre que, malgré un pourcentage équivalent entre les deux groupes de répondant.e.s pour une question du premier niveau déclaratif, les étudiant.e.s de bachelier maîtrisent davantage ces processus car ils sont, en moyenne, plus capables d'inférer un raisonnement logique. Cela se confirme avec la seconde question du type opératoire concret car 70% des étudiant.e.s de l'AESI ne savaient pas expliquer en quoi les processus de fission et fusion était, ou pas, en contradiction. Cela correspond tout à fait aux conclusions tirées précédemment, couvrant la question $E = mc^2$, pour laquelle seul.e un.e étudiant.e avait réussi à expliquer cette équation. Cela se renforce avec la dernière question, concernant les processus de fission et de fusion réchauffant la Terre. En effet, seul.e.s 20% des répondant.e.s ont expliqué cela correctement en traitant des deux phénomènes. Les 80% restants n'ont rien répondu. Cela montre bien qu'une bonne réponse pour le niveau déclaratif, ne rime pas toujours avec une bonne compréhension des concepts. Cela renforce l'utilité d'avoir scindé les questions en différents niveaux, dépendants de la demande cognitive requise. En effet, ce découpage a permis d'inférer le niveau de connaissance des répondant.e.s de l'AESI en observant une coupure nette entre la question prédicative et les questions opératoires, signe que les concepts ne sont que partiellement maîtrisés par les étudiant.e.s.

5.6.2. Étudiant.e.s en master et en AEES

Au sujet des étudiant.e.s de master, nous observons globalement une très bonne compréhension et mise en application des connaissances liées aux processus de fission et de fusion nucléaires. En effet, tout.e.s les étudiant.e.s ont désigné la fission comme étant le processus se produisant dans les centrales nucléaires et tout.e.s ont cité également ce processus dans le cas d'un noyau lourd. Pour la question concernant la contradiction potentielle entre la fission et la fusion, 60% ont utilisé le concept-en-acte d'énergie libérée. Parmi celles/ceux-ci, la moitié ont lié cela avec le concept de stabilité des éléments radioactifs en utilisant un théorème-en-acte pouvant être formulé de la façon suivante : "Dans le cas d'une réaction nucléaire (fusion ou fission), le système est ramené à un état stable en libérant de l'énergie". Finalement, 60% des répondant.e.s ont pu identifier les processus de fission et de fusion dans le manteau terrestre et le noyau solaire, respectivement. Le reste des étudiant.e.s a identifié correctement un des deux phénomènes. Notons que parmi elles/eux, les 3/4 ont réussi à identifier la fusion solaire mais pas la fission terrestre. Cela peut s'expliquer par le fait que, durant les études en physique, nous abordons davantage la fusion dans le cœur des étoiles que de la fission dans la croûte terrestre.

Pour terminer cette analyse, nous allons étudier les réponses des étudiant.e.s de l'AEES. 2/3 des répondant.e.s ont expliqué que le processus utilisé dans les centrales nucléaires était la fission. Notons tout de même que 27% des répondant.e.s se sont trompé.e.s et ont dit qu'il

s'agissait de la fusion nucléaire. Il s'agit du seul groupe où cette réponse est présente. Dans les autres groupes, les étudiant.e.s ont soit répondu qu'il s'agissait de la fission, soit qu'elles/ils ne s'avaient pas. Mais aucun.e n'a répondu qu'il pouvait s'agir de la fusion. Cela peut s'expliquer, encore une fois par les différents parcours académiques et professionnels suivis par les étudiant.e.s en AESS, même si, selon nous, il s'agit tout de même d'une connaissance théorique "de base" que chaque citoyen.ne devrait connaître. De plus, la majorité des mêmes étudiant.e.s ont dit qu'il était préférable de considérer le processus de fission pour un noyau lourd. Cela montre une scission entre, d'un côté, 2/3 des répondant.e.s qui maîtrisent les concepts de base et qui savent les mettre en application dans un contexte simple, et de l'autre, le dernier tiers des étudiant.e.s qui ne maîtrise pas les concepts élémentaires au sujet de la fission et fusion nucléaire. Pour la question abordant la potentielle contradiction entre les deux processus nucléaires, 47% des répondant.e.s ont expliqué cela à l'aide du concept-en-acte d'énergie et de stabilité mais peu sont rentré.e.s dans les détails comme l'ont fait les étudiant.e.s de bachelier et de master. Elles/ils ont, par exemple, simplement dit qu'il y avait "une production d'énergie dans les deux cas". Enfin, 33% des répondant.e.s ont justifié correctement les processus de fission et de fusion sur Terre et dans le Soleil. Toutefois, la moitié des étudiant.e.s n'a pas répondu à cette interrogation, ce qui questionne leur capacité à utiliser ces concepts dans une situation légèrement plus complexe que précédemment.

5.6.3. Graphiques

Synthétisons maintenant tous ces résultats à l'aide de graphiques. Les premiers montrent les explications données par les étudiant.e.s pour justifier la production d'énergie via les processus de fission et de fusion nucléaires. Nous remarquons, comme annoncé précédemment, qu'un peu moins de la moitié des étudiant.e.s en bachelier a utilisé les concepts-en-acte de libération d'énergie, de stabilité et de défaut de masse. Pour les étudiant.e.s en master et à l'AESS, cette proportion représente plus de la moitié des répondant.e.s. Chez les étudiant.e.s de l'AESI, nous constatons un très faible taux de réponse, signe d'une incompréhension du fonctionnement de ces deux processus.



Figure 14 : Fission et fusion, une contradiction ? Source : Auteure

Pour résumer la compréhension et l'application des concepts de fission et de fusion nucléaires, nous avons réalisé le graphique ci-dessous. Ce dernier permet de mettre en évidence le taux de réponses correctes obtenues pour les 3 questions requérant l'utilisation de ces processus. Pour rappel, la première sollicitait le processus en jeu dans les centrales nucléaires ; la deuxième réclamait le procédé à privilégier lors de la présence d'un noyau lourd et la troisième demandait de justifier la présence de fission et de fusion nucléaires dans des phénomènes naturels. À l'exception des étudiant.e.s de l'AEES, la majorité des répondant.e.s a correctement utilisé ces concepts pour la première question. Pour les étudiant.e.s en bachelier et de master, les résultats restent très bons pour la deuxième question. C'est moins le cas pour les étudiant.e.s de l'AESI. Pour la troisième question, seul.e.s les répondant.e.s de master ont, en moyenne, bien identifié les processus de fission et de fusion. Pour les étudiant.e.s de l'AEES, nous remarquons un pourcentage étonnamment bas pour la première question. En revanche, pour les deux autres questions (2 et 3), les répondant.e.s de l'AEES ont obtenu de meilleurs résultats que celles/ceux de l'AESI. Cela reste tout de même en dessous des résultats des étudiant.e.s en bachelier et en master. On observe donc clairement une amélioration des performances en fonction du niveau de scolarité, avec des résultats meilleurs pour les étudiant.e.s de master que ceux des étudiant.e.s de bachelier et de l'AESI. En effet, ces derniers ont plus de mal à utiliser leurs connaissances théoriques lors de nouvelles situation-problèmes. Enfin, nous constatons un score relativement bas pour les

répondant.e.s de l'AESI et de l'AESS. Il est donc nécessaire de renforcer la formation de ces futur.e.s enseignant.e.s.

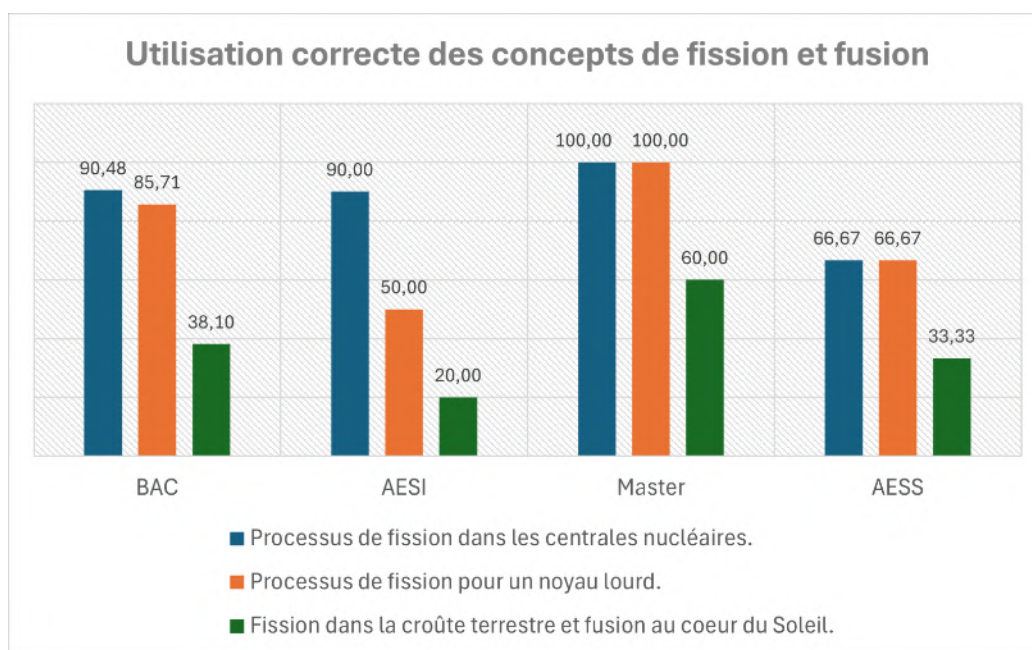


Figure 15 : Utilisation correcte des concepts de fission et fusion. Source : Auteure

5.7. Conclusion des analyses

Après cette analyse, reprenons les tendances globales. Nous observons la présence de préconceptions chez tous les groupes de répondant.e.s mais à des degrés différentes. Pour ce qui concerne la conception alternative “la radioactivité est un processus dangereux”, nous observons sa présence chez une majorité d’étudiant.e.s de l’AESI, moins chez les répondant.e.s en bachelier et à l’AESS, et encore moins chez les étudiant.e.s en master. Nous constatons donc une réelle progression dans le détachement de ces préconceptions lors d’un raisonnement scientifique en fonction du niveau d’étude. Le concept-en-acte de “quantité de radiation” est souvent utilisé pour justifier la dangerosité d’une source radioactive. À propos du caractère naturel des processus radioactifs, nous remarquons une bonne maîtrise de cette notion à travers l’enchaînement des différentes questions déclaratives et explicatives. Dans l’ensemble, les étudiant.e.s de bachelier, de master et de l’AESS, présentent peu de traces de cette préconception dans leur raisonnement. Seul.e.s les étudiant.e.s de l’AESI présentent une compréhension limitée. En effet, leur manque de connaissances théoriques les empêche de faire des inférences lors de nouvelles situations. Il est donc impératif de renforcer la formation de ces futur.e.s enseignant.e.s. Au sujet des concepts de demi-vie et de décroissance radioactive, nous constatons une maîtrise théorique de ces notions par l’entièreté des étudiant.e.s en master ainsi que 3/4 des étudiant.e.s de bachelier et de l’AESS. Pour la plupart des étudiant.e.s de l’AESI, le concept de désintégration radioactive n’est pas acquis. Cela a des

répercussions lors de l'application de ces notions. Les répondant.e.s en master et de l'AESS utilisent davantage ces concepts lors de nouvelles situations, ce qui renforce l'idée qu'une meilleure formation permet une maîtrise plus complète de ces notions et un éloignement des conceptions initiales. Cela se confirme avec le concept-en-acte de pouvoir de pénétration. Celui-ci est davantage utilisé à bon escient par les étudiant.e.s de master que par les autres groupes de répondant.e.s. On constate un usage de ce concept très limité chez les étudiant.e.s de l'AESI et de l'AESS lors d'une situation requérant une demande cognitive plus importante. Cela renforce la nécessité d'une formation conceptuelle plus poussée des futur.e.s enseignant.e.s en sciences. Concernant la production d'énergie, les notions centrales telles que l'énergie de liaison ou le défaut de masse sont davantage employées par les étudiant.e.s de master, ce qui les amène à réaliser un raisonnement plus nuancé et détaillé lors d'une question en lien avec les enjeux sociétaux. Cela accentue la nécessité de posséder des connaissances complètes sur une thématique afin d'inférer des raisonnements plus complexes et plus riches sur le sujet. Ce genre de réflexions sont demandées aux élèves du secondaire afin de leur permettre d'agir sur le monde en qualité de scientifiques. Il est donc capital de leur donner les connaissances théoriques fondamentales. Cela se confirme avec les dernières notions questionnées, celles de la fission et fusion nucléaire. Nous observons une corrélation directe entre le niveau de maîtrise de ces concepts et une bonne utilisation de ces derniers lors d'une situation concrète. Encore une fois, les étudiant.e.s de l'AESI et de l'AESS obtiennent de résultats inférieurs à ceux de bachelier et de master. Une attention toute particulière est donc à apporter à leur formation afin qu'elles/ils ne colportent pas des erreurs de raisonnement dans leurs futures classes et qu'elles/ils puissent aider les élèves à dépasser, à leur tour, leurs préconceptions.

En conclusion de toutes ces analyses, nous observons plusieurs tendances globales. D'un côté, les étudiant.e.s de bachelier semblent bien maîtriser les concepts théoriques et certain.e.s présentent des raisonnements complets et argumentés. Les étudiant.e.s de l'AESI, quant à elles/eux, présentent de grosses lacunes dans leur maîtrise des notions théoriques et cela se propage dans leurs analyses d'une nouvelle situation-problème. Les étudiant.e.s de master maîtrisent très bien les différents concepts testés et sont, dans l'ensemble, capables d'inférer des raisonnements situés et très argumentés lors de situations complexes. Finalement, les étudiant.e.s de l'AESS, de par la variété des profils des étudiant.e. suivant cette formation, obtiennent des résultats assez hétérogènes. Suite à leur parcours académique et professionnel, les répondant.e.s maîtrisent plus ou moins les concepts théoriques, limitant leur compréhension d'une nouvelle situation.

Nous insistons donc sur la nécessité d'offrir aux étudiant.e.s de l'AESI et de l'AESS une formation poussée sur les différents concepts théoriques mais également sur les difficultés conceptuelles liées à cette thématique. En effet, lors de cette recherche, nous avons mis en évidence la relation entre la qualité des enseignements et la maîtrise conceptuelle des

notions. Une attention particulière est donc à apporter lors cette formation afin qu'elle permette à ces futur.e.s enseignant.e.s de dépasser leurs préconceptions et d'offrir, par la suite, un enseignement de qualité pour tout.e.s leurs élèves. Nous pourrions questionner la nécessité de donner aux étudiant.e.s de l'AESI une formation poussée en physique nucléaire alors que ces dernier.ère.s n'enseigneront jamais ces notions. Pourtant, il est essentiel que les enseignant.e.s en sachent toujours davantage que ce qu'elles/ils donnent en cours. C'est, entre autres, pour cette raison que les étudiant.e.s en AESS possèdent un master disciplinaire. Il est primordial que les enseignant.e.s dans le secondaire inférieur aient une maîtrise poussée des concepts du secondaire supérieur afin de répondre aux questions des élèves curieux.euses, de pouvoir donner un sens aux savoirs et d'éviter d'enseigner des notions pouvant contredire les concepts futurs. Par exemple, les étudiant.e.s en AESI seront amené.e.s à enseigner la structure atomique à leurs élèves. Il est important qu'elles/ils sachent justifier, en cas de questions des élèves, pourquoi les protons restent liés dans le noyau, alors qu'habituellement, les objets de même charge se repoussent. L'explication se trouve dans l'interaction forte, appelée aussi interaction nucléaire. Grâce à une formation conceptuelle détaillée sur les concepts en lien avec la physique nucléaire, les enseignant.e.s pourront répondre correctement à ce type de questions en offrant une réponse adaptée au niveau des élèves tout en éveillant leur curiosité. On comprend donc mieux l'importance d'offrir des connaissances approfondies aux enseignant.e.s du secondaire, quel que soit le degré.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

Pour terminer cette recherche, nous pouvons revenir sur les deux conclusions principales de notre étude.

D'une part, malgré la présence de traces de conceptions erronées dans tous les groupes de répondant.e.s, nous observons un détachement de ces préconceptions avec le niveau d'étude. En effet, les étudiant.e.s de master sont celles/ceux ayant le plus de raisonnements complets et nuancés lors de nouvelles situations-problèmes et ce, quel que soit la conception visée. Nous avons également mis en évidence la corrélation entre bonne maîtrise théorique et bonne inférence lors de nouvelles situations. Nous observons que lorsque l'apport théorique de l'enseignement n'est pas suffisant, les élèves retournent dans leurs préconceptions et la compréhension commune de la physique nucléaire. Il est donc capital de fournir aux étudiant.e.s des notions théoriques afin que celles/ceux-ci puissent développer des raisonnements riches et situés, et donc, prendre part à notre société démocratique.

D'autre part, nous concluons à un manque alarmant de formation conceptuelle chez les futur.e.s enseignant.e.s du secondaire inférieur et supérieur. Cela ne permet donc pas de répondre à la directive de la Wallonie-Bruxelles Enseignement qui promeut une formation scientifique permettant aux élèves du secondaire d'agir en citoyen.ne.s éclairé.e.s. Il est donc essentiel de modifier la formation initiale des enseignant.e.s afin de garantir un meilleur apprentissage des concepts physiques théoriques et aussi une approche didactique plus poussée leur permettant de créer des outils / activités réfléchies mettant à défaut les préconceptions de leurs futur.e.s élèves.

Si nous revenons sur les prérogatives du référentiel, nous pouvons conclure que, malheureusement, la formation reçue par les étudiant.e.s sortant du secondaire n'est pas suffisante pour réaliser des inférences riches et nuancées. En effet, malgré les bonnes réponses des étudiant.e.s en bachelier, les répondant.e.s en AESI montrent davantage de difficultés pour répondre aux questions opératoires abstraites. Il est donc important de renforcer le cours sur la physique nucléaire en secondaire et cela passe, entre autres, par une meilleure formation des futur.e.s enseignant.e.s. La capacité de certains élèves du secondaire à réaliser des inférences lors de nouvelles situations n'est pas suffisante pour leur permettre d'agir sur le monde en tant que scientifique.

Nous remarquons une contradiction avec les hypothèses émises en introduction. De fait, nous avons supposé que les étudiant.e.s en AESS présenteraient moins de conceptions erronées dans leur raisonnement. Toutefois, cette étude a montré que ce n'était pas le cas. Nous étions partis du principe que, possédant un master disciplinaire préalable, elles/ils étaient moins à

même de réaliser des erreurs conceptuelles. Néanmoins, nous n'avions pas pris en compte la diversité des profils rencontrés dans cette formation. En effet, la majorité d'entre elles/eux n'ont pas ou peu suivi de cours avancés de physique nucléaire durant leur parcours car elles / ils possèdent, la plupart du temps, un master en biologie, bioingénierie, sciences biomédicales ou encore en génie civil. Cette composante rajoutée, nous comprenons mieux pourquoi les étudiant.e.s en deuxième année de master en sciences physique obtiennent de meilleurs résultats.

À l'avenir, plusieurs perspectives pour étendre ou approfondir notre recherche sont possibles. Tout d'abord, nous pourrions mieux tenir compte des différents parcours académiques et professionnels des répondant.e.s. Cela permettrait de comprendre plus en profondeur l'importance et la portée du cours de physique nucléaire tel que donné en dernière année du secondaire. En effet, nous n'avons pas systématiquement comparé le parcours et les résultats de chaque étudiant.e et cela pourrait se révéler utile si nous désirerions explorer davantage la corrélation entre les cours reçus et la capacité à réaliser des inférences lors de nouvelles situations. Nous pourrions également réaliser des interviews avec certain.e.s répondant.e.s pour aller dans ce sens. Cela nous donnerait l'opportunité d'inférer plus précisément les invariants opératoires utilisés par l'étudiant.e.s et, donc de creuser plus dans leur système explicatif.

Nous pouvons également étendre cette méthodologie à d'autres thématiques traitées dans le cours de sciences comme les énergies renouvelables, le changement climatique ou l'écologie en biologie. En effet, ces thèmes ont le même statut que la physique nucléaire, c'est-à-dire qu'il s'agit aussi d'éléments appartenant à des sujets de société et sur lesquels le référentiel met l'accent. Nous pourrions donc élargir notre méthodologie en réalisant un questionnaire mettant en évidence d'autres conceptions erronées spécifiques à la thématique considérée. En réalisant le même enchainement de questions avec des demandes cognitives croissantes, nous pourrions mettre en lumière l'engagement des répondant.e.s dans ces préconceptions et comparer cela avec le niveau d'études.

Un élargissement de cette recherche pourrait également se faire dans d'autres domaines. Par exemple, nous pourrions réaliser une étude montrant les potentielles implications de cette non-maitrise des concepts théoriques ou de la difficulté de certains groupes d'étudiant.e.s à réaliser des inférences lors de nouvelles situations. Ceci est hors du cadre de la didactique de la physique mais pourrait être une extension pertinente de notre recherche.

Annexe I

Analyse de manuels scolaires

I.1. Introduction

Ce complément de recherche, dans le domaine de la didactique de la physique, a pour objectif premier d'analyser les conceptions alternatives présentes dans les manuels scolaires. La motivation de ce complément de recherche est d'agrandir notre analyse à des ressources qui sont essentielles, à la fois pour les étudiant.e.s et les enseignant.e.s. En effet, la plupart des professeur.e.s en sciences ne sont pas physicien.ne.s de formation, mais possèdent d'autres bagages tels qu'un master en biologie, en chimie ou en ingénierie. La physique nucléaire n'est donc pas un thème pour lequel elles/ils sont bien formé.e.s. Si elles/ils sont amené.e.s à enseigner ce chapitre, elles/ils vont se baser sur les manuels à leur disposition pour construire leur cours. De fait, les manuels sont une figure d'autorité sur le savoir à enseigner et sont utilisés dans de nombreux établissements scolaires. On comprend alors mieux le rôle essentiel des manuels, principalement sur les enseignant.e.s débutant dans la profession. Il est donc essentiel qu'ils puissent permettre aux élèves, mais également aux enseignant.e.s, d'aller au-delà de leurs conceptions spontanées.

La question à laquelle nous essayons donc de répondre est de savoir si nous trouvons des traces de préconceptions en physique nucléaire dans les manuels scolaires actuels et anciens. Après avoir examiné le manuel actuel, publié en 2017, nous allons étendre notre analyse à un manuel datant du référentiel précédent, c'est-à-dire de 2003. Cette seconde analyse aura pour objectif d'observer une évolution dans la manière de traiter la physique nucléaire. Il est essentiel que les manuels d'aujourd'hui mettent l'accent sur les enjeux actuels liés à l'énergie mais était-ce aussi le cas pour les manuels plus anciens ? Est-ce que les sujets en lien avec le nucléaire sont traités différemment en 2003 qu'en 2017 ? Ce sont des questions auxquelles nous tenterons de répondre dans notre analyse.

L'objectif principal de cette recherche est donc bien de déceler la potentielle présence de conceptions alternatives dans les livres de référence. Toutefois, plusieurs objectifs intermédiaires sous-tendent ce but. Tout d'abord, nous souhaitons analyser les choix didactiques réalisés dans le manuel datant de 2017 sur base du référentiel en application. Ensuite, comme les référentiels et manuels mettent en avant les enjeux sociétaux et invitent les enseignant.e.s à faire réfléchir les élèves à ces différents défis avec un regard scientifique, nous essayerons donc de mettre en évidence comment cette directive est mise en application dans le manuel et quelle place est laissée à ces questions socialement vives. Finalement, nous avons également comme intention de mettre en lumière les différences présentes entre les deux manuels analysés et d'étudier les choix didactiques posés par les rédacteur.rice.s du

manuel datant de 2003. Tout cela va nous permettre de tirer des conclusions sur les transpositions didactiques réalisées dans chacun des manuels.

Avant de passer à la méthodologie et aux résultats de notre analyse, il est important de formuler nos hypothèses. Tout d'abord, les manuels scolaires peuvent se révéler être une aide considérable pour pallier aux préconceptions des élèves et des enseignant.e.s. S'ils ont été écrits en anticipant les différentes difficultés des élèves, nous pourrions observer peu de traces des conceptions alternatives mises en évidence précédemment dans notre recherche. À l'inverse, les manuels scolaires peuvent renforcer ces préconceptions en ne les anticipant pas ou en les passant sous silence, engendrant toutes les difficultés sous-jacentes : incompréhension des élèves, compréhension partielle du savoir, refus de l'apprenant.e à modifier son schème, ... Les manuels peuvent également présenter le savoir de manière très théorique, permettant aux élèves, dans le cadre de notre recherche, de répondre aux questions de type déclaratif mais pas de s'approprier la matière enseignée et de répondre à des questions opératoires. Cela ne permettrait alors pas aux apprenant.e.s d'apprendre à développer un esprit critique et à produire un raisonnement scientifique argumenté.

Nous pouvons également nous attendre à observer une approche de la physique nucléaire différente en fonction de la date de publication du manuel scolaire. En effet, historiquement, les mises en garde face au danger du nucléaire sont arrivées bien plus tard. Nous pourrions donc observer une différence de traitement à propos de la première préconception identifiée « Le nucléaire est dangereux ». Évidemment, certains accidents et armes nucléaires ont été réalisés avant 2003, date de publication du manuel le plus ancien, mais d'autres accidents majeurs ont eu lieu par la suite (tel que l'incident de Fukushima en 2011). De plus, Le référentiel belge met l'accent sur les enjeux sociétaux pour les mettre au centre de l'apprentissage des sciences. Nous pourrions donc constater, soit une mise en avant de ces thématiques, comme préconisé par les programmes, soit un placement au second plan de ces questions.

I.II. Révision de la littérature

Dans cette revue de littérature miniature, nous nous concentrerons que sur le traitement de certains manuels sur quelques préconceptions choisies. Nous analyserons séparément différentes notions gravitant autour de la physique nucléaire. Nous considérerons d'abord différentes préconceptions en lien avec la notion d'énergie et l'équation bien connue $E = mc^2$. Nous présenterons ensuite les résultats de deux recherches montrant le traitement de ces sujets à travers la scolarité française et l'impact de ce traitement sur les questions de société. Comme cela a été fait précédemment, nous n'analyserons pas en profondeur ici les différentes conceptions alternatives dans le domaine de la physique nucléaire, mais uniquement celles qui ont été traitées via le prisme des référentiels scolaires. De plus, il est

important de souligner que, malgré nos nombreuses recherches, il semblerait qu'aucune analyse des différents programmes et manuels scolaires en physique nucléaire ait été faite dans le cadre de l'éducation belge francophone. Notre recherche est donc novatrice dans ce domaine et nous espérons voir émerger, à l'avenir, de plusieurs travaux dans ce champ de recherche, encore vaste et non investigué.

Intéressons-nous, en premier lieu, aux différentes préconceptions en lien avec la notion d'énergie. Cette dernière est une notion complexe à assimiler pour les élèves. En effet, elle est présente, à la fois dans le domaine scientifique et dans le domaine de la vie courante. Par exemple, le terme ne revêt pas la même signification dans le contexte de la thermodynamique, dans celui de l'économie ou lorsqu'il s'agit de la forme physique d'une personne (Bächtold and al, 2014). D'une part, une approche scientifique veut que l'énergie soit une grandeur caractéristique d'un système et, d'autre part, une approche socio-économique et environnementale indique que l'énergie peut être produite, stockée, transportée et consommée. Ce double discours entraîne de l'incompréhension chez les étudiant.e.s et la formation de conceptions erronées en physique. En outre, si l'on se restreint au domaine scientifique, la notion d'énergie n'est pas aisée à comprendre pour les apprenant.e.s. En effet, sa définition ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique et est encore débattue. De plus, la compréhension de concept d'énergie demande une abstraction importante, car il ne s'agit pas d'une quantité directe. De fait, il n'existe pas « d'énergimètre » qui calcule la quantité d'énergie dans un système, comme il existe un ampèremètre ou un baromètre. Son calcul passe par la mesure indirecte d'autres quantités, telles que la masse ou la charge électrique. De surcroît, le concept d'énergie est présent dans énormément de phénomènes qui n'ont, en apparence, pas de lien entre eux (phénomènes chimiques, thermiques, mécaniques, nucléaires,...). Tout cela mène à une difficulté de compréhension pour les élèves du concept d'énergie, mais aussi de toutes les notions qui gravitent autour, comme les sources d'énergie, les formes d'énergie ou le transfert d'énergie.

Après la présentation des problèmes de compréhension qui sont induits par la notion d'énergie, intéressons-nous à la manière dont cette thématique est traitée dans les programmes et manuels français au lycée (équivalent aux 4^e, 5^e et 6^e secondaires belges). Il est intéressant de noter que le programme français, tout comme le belge, met l'accent sur les sujets de société actuels. Dans ce contexte, il y a une volonté d'éduquer les étudiant.e.s à l'énergie, c'est-à-dire à leur fournir les connaissances et compétences relatives à l'énergie pour encourager les jeunes à former leur propre opinion puis à prendre des décisions et à agir. Il y a donc l'objectif de rendre les élèves conscient.e.s des problèmes liés à l'énergie, dont l'énergie nucléaire. Au lycée, les programmes insistent en disant que le cours de physique-chimie est essentiel pour inciter les étudiant.e.s à poser des comportements sociétaux responsables. Une première analyse intéressante des manuels montre que ces aspects sociétaux suivent toujours les connaissances théoriques et non l'inverse. On peut donc

regretter que ces enjeux n'apparaissent pas à l'entrée des chapitres, afin de servir de fil conducteur à la connaissance. Ainsi, bien que les programmes affichent une volonté claire d'intégrer les enjeux sociétaux liés à l'énergie dans l'enseignement, les auteur.rice.s constatent un traitement superficiel et secondaire de ces enjeux. Cela souligne l'importance d'une meilleure articulation entre connaissances scientifiques et enjeux citoyens dans la construction des savoirs scolaires. En ce qui concerne plus particulièrement la physique nucléaire, celle-ci est abordée en 1^{re} S (cela équivaut à la 5^e secondaire, option sciences). Il est préconisé par le programme d'aborder les notions de « défaut de masse » et « d'énergie libérée ». Toutefois, il n'est pas mentionné le concept « d'énergie de masse ». Pourtant, il s'agit de la forme d'énergie en jeu durant une réaction nucléaire, portée par l'équation $E = mc^2$. Heureusement, 3 des 5 manuels analysés comblent cette lacune en introduisant tout de même ce concept (Bächtold and al, 2014). Nous reviendrons sur ces différents éléments par la suite avec une analyse plus minutieuse des concepts abordés ou non dans les programmes et manuels scolaires.

Le deuxième concept sur lequel nous allons nous attarder provient de l'équation $E = mc^2$. L'interprétation de cette équation est source de plusieurs préconceptions. Beaucoup d'étudiant.e.s considèrent que cette équation signifie que la masse peut être convertie en énergie. Or, cette interprétation n'est pas correcte et est un frein à la compréhension de plusieurs concepts sous-jacents comme la conservation de l'énergie. En effet, la masse ne peut pas « devenir » de l'énergie et inversement. « *Parce que l'énergie est conservée, comment l'énergie pourrait-elle être convertie en quelque chose d'autre et vice versa* » (Baierlein, 2007). Pour aider à la compréhension des élèves, il est donc essentiel que les programmes et les manuels scolaires aillent à l'encontre de cette interprétation. Cette conception erronée peut s'expliquer par une vision conceptuelle substantialiste, pour qui, la matière est confondue avec la masse et les rayonnements avec l'énergie. Une autre affirmation erronée possible sur base de l'équation $E = mc^2$ est de dire que la masse et l'énergie sont des grandeurs équivalentes. Cette équation exprime plutôt une relation qui existe entre ces deux grandeurs, dans le cas d'un système au repos, et non deux grandeurs interchangeables. Cette préconception freine, à son tour, la compréhension d'un concept-clé : l'énergie de masse. C'est pourtant cette énergie qui est au cœur des processus nucléaires.

Au niveau du programme et des manuels scolaires, plusieurs éléments sont mis en évidence par Bächtold (2014). Tout d'abord, l'équation $E = mc^2$ n'est pas présentée de la sorte, mais de la forme suivante : $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|/c^2$. On peut regretter cette écriture, car elle implique deux éléments. D'un côté, elle peut laisser croire qu'il existe un lien de causalité entre l'énergie libérée et le défaut de masse. Or, il n'en est rien. On peut parler uniquement d'une corrélation entre ces deux quantités. D'un autre côté, cette écriture restreint l'utilisation de cette équation uniquement au domaine de la physique nucléaire. Cela ne permet pas aux élèves d'apprécier la portée universelle de cette équation. Pour en revenir à une des conceptions

alternatives citées précédemment disant qu'il existe une conversion entre la masse et l'énergie, certains manuels la renforcent. En effet, dans différents manuels, on retrouve des expressions telles que « la masse peut se transformer en énergie » ou « la masse manquante a été convertie en énergie de liaison », ce qui renforce cette préconception. Pour ce qui concerne la conception erronée sur l'équivalence entre masse et énergie, aucun des manuels ne la renforce et ils parlent plutôt d'un système qui possède, en vertu de sa masse, une certaine énergie appelée « énergie de masse ». Pour rappel, cette notion n'est pas explicitée dans le programme. Dans ce dernier, il n'est pas non plus préconisé de faire le lien entre le nucléaire et la conservation de l'énergie. Selon l'auteur, cela aurait pourtant permis d'aller à l'encontre des préconceptions en ne laissant pas supposer que de l'énergie peut être formée à partir de la masse. De plus, cela aurait pu unifier plusieurs phénomènes physiques afin de permettre aux élèves d'observer un lien entre les chapitres enseignés. En terme de conservation, il semble essentiel pour l'auteur de parler, dans le cadre de la physique nucléaire, du principe de conservation de la masse qui, jusqu'ici, semble inébranlable. Dans le programme, le problème de la conservation de la masse n'est pas abordé et cela peut poser des problèmes conceptuels pour les élèves qui tiennent ce principe pour acquis depuis le début de leur scolarité. L'expression « défaut de masse » n'est pas bien choisi et il serait préférable de privilégier des expressions comme « perte de masse » ou « disparition de masse », comme le font certains manuels. En plus de l'énergie de masse, un autre concept non-abordé dans le programme est « l'énergie de liaison ». Pourtant ce concept essentiel pour comprendre l'origine de l'énergie libérée est source de nombreuses confusions. En effet, *« contrairement à ce que suggère cette expression, elle ne désigne pas une énergie que le noyau possède en vertu des liaisons entre ses nucléons, une énergie qui serait libérée si ses nucléons se séparaient »* (Bächtold, 2014). Il s'agit en réalité de l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés. Comme dit précédemment, cette notion n'est pas abordée par le programme, mais apparaît dans 4 des 5 manuels analysés. Néanmoins, la moitié de ces manuels font l'amalgame présenté précédemment en expliquant qu'il s'agit de l'énergie de cohésion interne du noyau. Cela renforce cette préconception et dessert la compréhension des étudiant.e.s. Une dernière notion est « l'énergie nucléaire ». Celle-ci correspond, dans le cas d'un noyau atomique, à l'énergie de masse. Ce concept n'est, encore une fois, pas proposé dans le programme. Il est néanmoins présent dans 3 manuels sur 5, mais aucun ne donne de définition ou ne fait le lien avec l'énergie de masse. Cela pose question, surtout si l'on s'attarde sur la signification qu'a cette expression dans le débat public. L'auteur questionne le fait que cette notion ne soit que peu ou pas abordée dans les manuels scolaires, alors qu'elle possède une place importante dans les discours de société autour du nucléaire.

Grâce à ces deux exemples analysant le traitement des préconceptions en lien avec les notions d'énergie et de l'équation $E = mc^2$ à travers les programmes et manuels scolaires, nous avons pu remarquer que certains choix didactiques du programme et des manuels scolaires ne semblent pas cohérents avec les objectifs avancés. De plus, nous constatons que, malgré une

volonté affichée d'inscrire davantage les concepts scientifiques dans les défis sociétaux actuels, cette approche est encore marginale et représente souvent un résumé des connaissances enseignées et non une porte d'entrée vers celles-ci.

I.III. Méthodologie

Nous n'allons pas réaliser une étude exhaustive de tous les manuels scolaires disponibles, cela prendrait un temps considérable et mériterait une étude plus vaste. Nous allons nous concentrer sur le plus répandu ; le manuel de Boeck pour les sciences de base (2017). Il est intéressant de souligner que nous nous concentrons sur les sciences de base et non, comme fait dans les analyses françaises, sur les sciences générales. En effet, notre but est de réaliser une analyse portée sur les connaissances minimales à maîtriser pour être un.e citoyen.ne de demain. Notre objectif n'est pas d'analyser le niveau de compréhension des étudiant.e.s ayant suivi une filière scientifique. Nous analyserons également un deuxième manuel de Boeck datant de 2003. L'objectif de cette deuxième analyse est de mettre en évidence les possibles différences de traitement des concepts en lien avec la physique nucléaire au fil des années et des réformes des programmes.

Afin d'effectuer ces analyses, nous allons procéder de la façon suivante. Tout d'abord, nous allons réaliser une première lecture globale du manuel le plus récent en le comparant avec le référentiel de la communauté française. Ensuite, nous effectuerons une deuxième lecture plus approfondie en s'attardant sur les différentes catégories de préconceptions visées : « La radioactivité comme un processus dangereux », « La radioactivité comme un processus artificiel/naturel », « La demi-vie », « La production d'énergie », « Les rayonnements radioactifs » et « La fission/fusion nucléaire ». Sur base de ces deux lectures, nous allons pouvoir analyser les connaissances présentées. On divisera les différentes notions selon le découpage en 3 catégories : déclaratives, opératoires concrètes et opératoires abstraites. Le but est d'observer si le manuel donne les clés nécessaires aux apprenant.e.s pour répondre aux questions des différents niveaux, c'est-à-dire, s'il donne les outils pour réaliser une réflexion requérant une demande cognitive plus importante et située dans les différentes connaissances présentées. Ainsi, nous en tirerons des conclusions sur les choix et transpositions didactiques réalisées par les rédacteur.rice.s du manuel.

Par la suite, nous allons réaliser un processus d'analyse similaire pour l'ancien manuel. La première lecture globale sera centrée sur les différences entre le manuel de 2017 et celui de 2003. La seconde lecture aura pour objectif de mettre en évidence les différentes phrases ou expressions de l'ancien manuel qui renforceraient les préconceptions citées précédemment. Nous allons ainsi pouvoir découper les différentes notions abordées dans le manuel en 3 catégories dépendant de la complexité cognitive. Grâce à cette démarche, nous pourrons

inférer des conclusions sur les transpositions didactiques réalisées par l'ancien manuel ainsi que sur les différences présentes entre les deux manuels scolaires.

I.IV. Transposition didactique

Afin de réaliser cette analyse, il est intéressant de définir la notion de transposition didactique. En effet, cette dernière sera au centre de ce complément d'étude. Une connaissance est produite par les scientifiques, c'est-à-dire les spécialistes du domaine ayant eu un intérêt à la création de ce savoir. Il s'agit d'un savoir savant, un savoir universitaire, créé par et à destination des experts. Mais ce savoir savant, hors de son cadre initial, n'est pas compréhensible. Pour enseigner ce savoir, il est important d'y apporter des modifications pour le rendre intelligible aux yeux des élèves. Cette transformation de savoir s'appelle la transposition didactique. Cette notion a été défini par Yves Chevallard, didacticien des mathématiques.

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 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, 1991)

Dans le cadre scolaire, le « savoir savant » va subir une transposition didactique dite « externe » pour le modifier en « savoir à enseigner ». Ces derniers correspondent aux recommandations des programmes et référentiels, mais également des manuels scolaires et autres livres de références. Il s'agit de décisions prises par les conceveur.euse.s de programmes, les rédacteur.rice.s de manuels, les inspecteur.rice.s,... Tous ces personnes sont regroupées, selon Chevallard, sous le nom de « noosphère ». Cette transposition didactique est qualifiée d'externe car elle est réalisée en dehors de la classe. Dans l'analyse des manuels, il s'agit donc bien ici d'étudier la transposition didactique externe qui a dû se faire afin de modifier le savoir savant en savoir à enseigner. Nous nous intéresserons donc aux choix didactiques qui ont été réalisés afin d'inscrire les savoirs émanants des experts dans le contexte scolaire.

Une deuxième transposition didactique appelée « interne » transforme les « savoirs à enseigner » en « savoirs enseignés », puis en « savoirs assimilés ». Cette transposition a lieu au sein de la classe et est réalisée par les enseignant.e.s et les élèves. En effet, le savoir à enseigner est réorganisé par l'enseignant.e afin qu'il corresponde davantage à ses choix pédagogiques ainsi qu'au contexte de son école et à celui de ses élèves. Les étudiant.e.s s'approprient ensuite le savoir enseigné et le modifient pour enclencher le processus

d'apprentissage et ainsi modifier ou ajouter un schème. Dans le cadre de cette recherche, nous porterons moins attention à cette seconde transposition, étant davantage situationnelle et propre à chaque enseignant.e et apprenant.e.

Pour illustrer ces concepts, nous allons prendre l'exemple de la datation au carbone 14. Dans le cadre du savoir savant, différentes notions rentrent en compte pour expliquer ce procédé comme la spectroscopie de masse ou l'existence de rayons cosmiques à l'origine de la formation de carbone 14. Mais, lors de la transposition didactique externe, ces notions ont été volontairement occultées afin de privilégier des savoirs à enseigner qui ont été jugés intelligibles et pertinents. Ces derniers sont donc plus réduits et plus simplifiés permettant aux élèves de comprendre que les éléments radioactifs suivent une décroissance exponentielle et que le temps de demi-vie du carbone 14 est très utile pour dater l'âge d'objets archéologiques. Il ne s'agit pas simplement d'une vulgarisation des concepts mais bien d'une adaptation de ceux-ci au cadre scolaire. Cette adaptation peut parfois donner lieu à des erreurs conceptuelles ou des simplifications trop importantes. Un autre exemple est le processus de fission et de fusion nucléaire. En effet, il serait impensable d'enseigner aux élèves de 6^e secondaire ces processus de manière parfaitement rigoureuse. Des concepts avancés en lien avec la physique quantique, la physique du plasma ou les contraintes technologiques vont être omis ou simplifiés. Les concepteur.rice.s de manuels vont alors essayer de donner une idée « la moins fausse » et la plus intelligible possible, par exemple, à l'aide de l'équation $E = mc^2$ et du concept de défaut de masse. Cependant, comme rencontré dans la littérature, la justification à l'aide de cette équation n'est pas suffisante et mène à plusieurs conceptions erronées : l'équivalence entre la masse et l'énergie ou la conversion de masse en énergie, par exemple. Il est donc intéressant d'analyser et de questionner ces choix réalisés dans l'objectif de favoriser l'apprentissage des élèves. C'est ce que nous allons essayer de mettre en évidence dans notre analyse des deux manuels présentés ci-dessus.

I.V. Résultats des analyses

Nous allons découper notre analyse en 2 parties. D'abord, nous considérerons les aspects en lien avec la forme, c'est-à-dire la présentation des savoirs dans les deux manuels. En effet, ces derniers ont choisi des approches très différentes qu'il est intéressant de souligner. Ensuite, nous nous concentrerons sur le fond, à savoir les différentes notions mentionnées par les manuels. Nous essaierons de mettre en évidence les choix didactiques posés et, à la lumière de la littérature citée précédemment, d'apporter un regard critique sur les définitions et les notions abordées.

Tout d'abord, en considérant la forme (la présentation), les deux manuels ont fait des choix très différents. Concernant le manuel de 2017, les rédacteur.rice.s ont opté pour une approche scolaire en mettant les connaissances théoriques au premier plan. Les thématiques

en lien avec la physique nucléaire sont divisées en 3 chapitres. Le premier chapitre démarre avec un petit contexte historique faisant appel aux travaux de Marie et Pierre Curie. Par la suite, les savoirs théoriques s'enchainent en double colonnes aérées par des schémas explicatifs. Chaque chapitre se termine par une batterie d'exercices faisant référence aux notions abordées précédemment. Dans les référentiels, il est préconisé de se limiter à des exercices qualitatifs afin de s'attarder principalement sur les phénomènes. Le manuel prend le parti d'aller à l'encontre de cette recommandation, en demandant explicitement de calculer des valeurs chiffrées comme le temps de demi-vie, le défaut de masse et l'énergie libérée. De plus, chaque chapitre est conclu à l'aide d'une situation concrète dans laquelle les notions en lien avec la physique nucléaire sont mises en application. Nous retrouvons, par exemple, la présence de radon dans le sol belge, l'utilisation de radioéléments en imagerie médicale et les accidents nucléaires de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima. Ces textes explicatifs ont un but informatif et de dépassement. Il est regrettable que ce ne soit pas une activité impliquant davantage les élèves. Il est intéressant de souligner un manque criant de liens avec les enjeux sociaux actuels, alors que le référentiel insiste dessus en citant, par exemple, dans ses compétences : « Développer des arguments scientifiques en faveur et contre l'utilisation de ressources ou de technologies énergétiques ».

Considérons maintenant le manuel de 2003 afin d'identifier les différences notables au niveau de la forme. La thématique de la physique nucléaire commence par une mise en situation où il est demandé aux élèves de répondre à une petite dizaine de questions telles que « Que s'est-il passé à Tchernobyl en 1986 ? », « D'où provient l'énergie libérée par le Soleil ? » ou encore « Rechercher les raisons qui engendrent ou qui ont engendré la peur du nucléaire dans les populations humaines ». Le but est ici d'inviter les élèves à réfléchir d'emblée sur ces sujets sociétaux afin d'identifier leurs préconceptions, leurs lacunes potentielles et / ou leurs mésinformations. Cette mise en situation est très intéressante d'un point de vue didactique, car elle permet directement d'ancrer les connaissances à venir dans le réel et de permettre à l'enseignant.e d'utiliser et de construire les connaissances grâce à ces réponses. Un débat en classe pourrait même être organisé autour d'une de ces questions. Par la suite, cette section est divisée en deux chapitres. Le premier se concentre sur les centrales nucléaires et, sans rentrer dans les considérations théoriques, permet une compréhension globale et détaillée de leur fonctionnement. A l'intérieur de cette partie, les notions théoriques sont mises en gras et c'est dans le 2^e chapitre qu'elles sont regroupées au sein d'un lexique. La volonté est donc d'utiliser ces deux chapitres en parallèle afin de se servir du deuxième chapitre comme référent théorique pour appuyer la compréhension du fonctionnement des centrales nucléaires. Le sommaire est organisé de manière alphabétique, ce qui est un choix didactique questionnable. En effet, la méthode de datation au carbone 14, de part son nom, est placée avant les notions de demi-vie et de décroissance radioactive. Il est pourtant impossible d'expliquer cette méthode sans faire intervenir ces deux notions. C'est là que commence un jeu de va-et-vient entre les différentes connaissances et pages du lexique. Nous pensons qu'il

aurait été préférable d'utiliser un ordre pédagogiquement plus intéressant, comme c'est le cas dans le manuel de 2017. Pour clore ce chapitre, des différents exercices calculatoires sont proposés. Ces derniers sont semblables à ceux du manuel de 2017. Pour conclure cette thématique, le manuel de 2003 préconise un retour sur les questions de mise en situation afin de modifier, de nuancer et/ou d'ajouter des éléments de raisonnement à sa réflexion initiale. Dans ce manuel les enjeux sociétaux sont davantage au cœur de la réflexion des élèves et de la construction de la connaissance. En effet, la mise en situation permet d'ancrer dans le réel les savoirs et le premier chapitre a pour objectif de donner une image globale du fonctionnement des centrales nucléaires, ce qui devrait être enseigné à chaque futur.e citoyen.ne. De plus, nous constatons une prise de position marquée en défaveur de l'armement nucléaire dans le manuel de 2003. En effet, nous retrouvons des expressions comme « engin de destruction massive ». Ce n'est plus le cas dans le manuel de 2017. À titre personnel, nous trouvons cette neutralisation du livre de référence regrettable, car il est essentiel de parler des erreurs du passé et une invisibilisation de ces événements ne permet pas pleinement aux futur.e.s citoyen.ne.s de comprendre les tenants et aboutissants de la physique nucléaire.

Concernant le fond des propos tenus dans les deux manuels, nous observons une similitude très marquée. En effet, la majorité des paragraphes sont réécrits tels quels et plusieurs questions restent inchangées entre les deux livres de référence. Plusieurs concepts, hors du référentiel de Wallonie-Bruxelles Enseignement, se retrouvent dans les deux manuels. Par exemple, la fusion nucléaire, l'énergie de masse ou la notation nucléaire sont des notions ajoutées par les auteur.e.s. Cependant, cela nous semble essentiel à la bonne compréhension des élèves. Il est impensable pour nous d'aborder la notion de fission nucléaire en passant sous silence le processus de fusion, tant ce sujet est présent dans le débat public.

Nous allons maintenant porter notre attention sur l'intersection entre notre questionnaire et les manuels. Sur les 12 questions du niveau explicatif (2 par préconceptions) dans le questionnaire, 10 ont été traitées par les deux manuels et le livre de 2017 en aborde une supplémentaire : la présence de radon dans les habitations belges. De plus, 3 des 6 questions inférentielles sont aussi évoquées par les deux manuels. Cela montre, qu'en plus des notions théoriques, les manuels apportent une attention particulière à la mise en application de ces concepts dans des situations-problèmes diverses. Nous allons maintenant détailler cette analyse en reprenant quelques-unes des questions et des préconceptions visées. La deuxième question posée dans notre questionnaire interroge la dangerosité d'une source émettant un rayonnement alpha. Les deux manuels utilisent également ce cas-là dans une des questions en demandant « Si la source de rayonnement alpha est hors du corps, il n'y aura pratiquement aucune irradiation du corps. Justifier cette affirmation ». Cela montre que les livres de référence invitent les élèves à effectuer des raisonnements plus poussés cognitivement. De même, nous avons demandé aux répondant.e.s s'il est dangereux d'habiter près d'une

centrale nucléaire. Les manuels apportent des éléments de réponse en disant que pour protéger les personnes des irradiations, une enceinte de béton très épaisse est édifiée. Pour la question concernant les irradiations médicales, le manuel de 2017 écrit dans son introduction : « Radiations ionisantes certes néfastes à la santé, mais utiles en radiothérapie et dans l'industrie ». Cela explique tout à fait le traitement que font les deux manuels à propos du nucléaire médical. D'un côté, ces derniers présentent tous les effets néfastes sur le corps humain qu'ont les rayonnements radioactifs, surtout le rayonnement gamma. De l'autre, le manuel de 2017 expose une application médicale du nucléaire avec la tomographie par émission de positons. En ce qui concerne la présence naturelle de radioactivité, les deux manuels l'illustrent en reprenant les doses annuelles de radiations ionisantes reçue par une personne selon la nature de la source (artificielle ou naturelle). Dans les sources naturelles, ils citent « rayons cosmiques », « matériaux terrestres », « radon » et « le corps lui-même ». De plus, ils insistent sur le caractère naturel de la radioactivité en disant que : « l'activité naturelle du corps humain est de 8000 Bq. Il y a donc en nous de nombreux noyaux instables ». Les livres de référence expliquent également le principe d'enrichissement de l'uranium utilisé dans les centrales nucléaires. Pour la question inférentielle en lien avec la datation au carbone 14, les deux manuels y consacrent une longue discussion afin de montrer l'implication de ce procédé archéologique.

Arrêtons-nous à présent sur les concepts en lien avec la notion de demi-vie. Les deux manuels, comme dit précédemment, invitent les élèves à déterminer ce temps graphiquement et par calculs. Ils précisent également explicitement qu'il est impossible d'accélérer le processus de désintégration nucléaire. On retrouve les phrases suivantes « Il ne nous est donc pas possible ni d'accélérer, ni de ralentir le débit des désintégrations radioactives d'une substance. », « Les deux paramètres qui fixent l'activité d'un matériau sont le nombre de noyaux instables qu'il contient et la demi-vie de ces noyaux. » Le manuel de 2003 insiste davantage en posant la question suivante en exercice : « Peut-on diminuer l'activité d'une substance radioactive par congélation ? ». Il est donc clair que les manuels apportent une attention particulière à cette conception erronée, afin d'essayer au mieux d'aller à l'encontre de cette dernière. Si nous considérons maintenant les concepts en lien avec la production d'énergie, on remarque que les manuels apportent beaucoup d'éléments de réponse, mais renforcent également certaines préconceptions mises en évidence précédemment dans la littérature. Nous nous attarderons sur les erreurs conceptuelles en lien avec l'équation $E = mc^2$ à la fin de cette analyse. Dans notre questionnaire, nous demandions s'il était nécessaire de rajouter des barres d'uranium dans les centrales nucléaires ou si l'entièreté de la matière première était placée initialement. Les manuels apportent la réponse en spécifiant que les barres d'uranium restaient 3 ans dans la cuve avant d'être changées. Concernant les enjeux climatiques, aucun des manuels ne se positionnent en faveur ou en défaveur des centrales nucléaires. Ils invitent les élèves à la réflexion avec des questions comme « Comparer les déchets nucléaires aux déchets des autres types de centrales électriques. », « Comparer les problématiques liées à

l'approvisionnement et au stockage des différents combustibles tels que le pétrole, charbon, gaz naturel et l'uranium utilisés dans les centrales électriques. » ou encore « Quels sont les coûts (environnementaux et énergétiques) connexes de l'électricité produite par les centrales nucléaires ? ». Comme dit précédemment, même si le manuel de 2017 pousse à la réflexion avec des exercices comme ceux-ci, les enjeux actuels ne sont pas les fils conducteurs de la connaissance. On aurait pu, à l'inverse, imaginer un chapitre dans lequel les savoirs s'articulent autour de la question écologique.

Les concepts en lien avec les rayonnements radioactifs sont évidemment bien présents dans les deux manuels. Ces derniers définissent et citent les trois types de rayonnements ainsi que leurs caractéristiques. Le manuel de 2017, plus que celui de 2003, insiste sur le concept de pouvoir de pénétration avec, entre autre, plusieurs illustrations. Comme dit précédemment, plusieurs applications ont été faites de ce concept : l'épaisse couche de béton nécessaire autour des centrales nucléaires ou encore, l'émission alpha. Dans le manuel de 2003, on trouve une question qui va même plus loin en demandant « Etre victime d'une irradiation par des beta et des gamma peut-il rendre le corps humain radioactif ? ». Cette question est vraiment très intéressante, car elle fait intervenir une préconception que nous avons lu à plusieurs reprises dans les réponses aux questionnaires ; le fait que le contact entre un objet et une source radioactive rend l'objet lui-même radioactif. Finalement, nous allons considérer les notions en lien avec la fission et la fusion nucléaire. Rappelons que le processus de fusion est absent du référentiel. Les manuels explicitent, évidemment, le processus de fission comme étant celui qui a lieu dans les centrales nucléaires et la fusion, comme étant réalisé dans les étoiles. Les manuels précisent également que la fission se réalise « au départ d'un gros noyau » et qu'il n'existe pas encore de réacteurs maîtrisant la fusion nucléaire. Tous ces éléments permettent de réaliser des inférences et de ne pas uniquement se restreindre aux connaissances théoriques. Il est intéressant de souligner que les manuels ont comme volonté de limiter les confusions et les raisonnements erronés. Pour preuve, nous pouvons observer cette phrase en introduction du concept de fusion : « Note : utilisé dans la physique des états de la matière, le terme « fusion » y prend un tout autre sens. Il désigne alors le passage de l'état solide à l'état liquide ». Concernant ce même processus, le manuel de 2017 dit ceci : « c'est donc peut-être le chemin d'avenir énergétique pour l'humanité ». Une différence importante entre les deux manuels est à relever. Dans celui de 2003, on explique le dégagement d'énergie et donc la production d'énergie grâce à la fusion et avec une augmentation de stabilité. Ce n'est pas le cas du manuel plus récent, qui a fait le choix d'entrer moins en profondeur dans ces considérations. Nous pouvons également observer une personnification des notions lors de l'explication des concepts de fission et de fusion. En effet, avec l'utilisation de certains mots, elles/ils donnent des caractéristiques ou des actions humaines à des concepts théoriques comme des noyaux et des électrons. On peut, par exemple, lire : « Des noyaux se soudent les uns aux autres pour former un seul noyau nécessairement plus gros ». Clairement, les noyaux ne réalisent pas de la soudure, mais

l'utilisation de ce verbe permet une visualisation conceptuelle plus aisée. Cette vision anthropocentrique peut aider les élèves, mais également être un frein à leur compréhension pour certaines notions comme celle de l'interaction forte. Il est de même avec les schémas. Même si ceux-ci ont pour objectif de servir d'illustration aux concepts, ces derniers peuvent, à l'inverse, freiner l'apprentissage. Par exemple, le fait de représenter une bille qui entre en collision avec un noyau peut induire les élèves en erreur. Ces derniers peuvent imaginer la fission nucléaire comme étant le résultat d'une collision mécanique classique et non comme une conséquence de l'instabilité nucléaire. De plus, le fait de représenter des neutrons et des protons d'un noyau à l'aide de boules colorées de tailles identiques, collées les unes aux autres peut être une source de confusion chez les élèves. Dans les faits, les protons et les neutrons ne sont pas de même taille, ne sont pas bien ordonnés dans le noyau et n'ont pas une position définie. Il s'agit, en effet, d'un comportement quantique. Nous ne rentrerons pas davantage dans cette discussion sur la représentation schématisée des atomes. Celle-ci est largement documentée dans le cadre de la didactique de la chimie.

Nous allons terminer cette analyse en traitant en particulier de l'équation $E = mc^2$. Dans la littérature, nous avons mis en évidence plusieurs préconceptions qui pouvaient en découler, dont certaines se retrouvant dans les manuels analysés. En effet, nous avons vu précédemment que l'équation $E = mc^2$ n'impliquait pas une équivalence entre la masse et l'énergie. Pourtant, les deux manuels titrent la section traitant de cette équation comme « Equivalence masse-énergie ». Cela est regrettable, d'autant plus que cela entraîne un lien de causalité entre ces deux grandeurs. Dans les manuels, il est explicitement écrit : « Si un système libère de l'énergie, c'est qu'il y a eu perte de masse. Inversement, la masse d'un système augmente si ce système reçoit de l'énergie du monde extérieur ». Cela renforce donc cette conception alternative. De plus, les deux manuels n'abordent pas directement les lois de conservation de l'énergie et de la masse alors qu'il semble essentiel de revenir dessus au regard de cette équation. Les deux livres de référence ont, à l'inverse, présenté d'autres lois de conservation : « Loi de conservation dans les réactions nucléaires : la somme des nombres de masse est conservée et la charge électrique totale est conservée ». Cela est problématique, car ça laisse sous-entendre que ces lois ne sont pas universelles, mais s'appliquent dans des cas particuliers ; la conservation de l'énergie, uniquement dans le cas cinétique et la conservation de la charge électrique, uniquement dans le cas nucléaire. Le manuel de 2003 rajoute à ce sujet « Cette diminution de masse est indécélable. Dans toutes les réactions chimiques, la loi de conservation de la masse (selon Lavoisier) reste donc d'application ». Cela ne permet pas aux élèves de comprendre correctement l'implication de l'équation $E = mc^2$. Selon nous, il aurait été essentiel d'insister davantage sur la loi de conservation de l'énergie en expliquant qu'il existe une énergie liée à la masse appelée énergie de masse et qu'il s'agit de cette énergie qui entre en jeu lors d'une réaction nucléaire. Dans les deux manuels, la notion de défaut de masse est abordée, mais le manuel de 2017 favorise l'expression « perte de masse ». Selon la littérature, cela permet d'aider les élèves à mieux comprendre cette

notion. De plus, le concept d'énergie de liaison est absent dans le manuel plus récent, mais présent dans le manuel de 2003. Toutefois, cette notion est mal définie et mal utilisée dans ce livre de référence. En effet, elle est définie de la sorte : « Energie de liaison : On appelle énergie de liaison d'un noyau l'énergie dégagée lorsqu'on forme ce noyau à partir de protons et neutrons isolés. Il s'agit donc d'une énergie de liaison entre nucléons au sein du noyau ». La première phrase est correcte, il s'agit bien de l'énergie qu'il faut fournir pour dissocier un noyau. Par contre, ce n'est en aucun cas une énergie de cohésion entre les nucléons et la deuxième phrase est scientifiquement incorrecte. De plus, le manuel de 2003 continue en faisant une analogie avec l'énergie dégagée lors d'une réaction chimique « Cette notion est similaire à celle utilisée en chimie à propos de la liaison chimique qui unit deux atomes au sein d'une molécule ». Encore une fois, cette affirmation n'est pas vraie et induit encore plus les élèves en erreur. Par la suite, une définition de l'énergie de liaison par nucléons est donnée. Dans les faits, il s'agit de l'énergie qu'il faudrait fournir pour arracher un nucléon au noyau. Encore une fois, pas l'énergie de cohésion entre un nucléon et le reste du noyau. Pourtant, dans le manuel, cela est défini de la façon suivante : « En divisant l'énergie de liaison par le nombre de nucléons que contient le noyau, on atteint plus précisément l'énergie qui lie un nucléon à ses voisins dans le noyau ». Il s'agit donc d'erreurs conceptuelles qui ont été probablement réalisées dans le but de simplifier et vulgariser les concepts enseignés. Néanmoins, cette transposition didactique ne doit pas rendre les notions fausses et en aucun cas être un frein pour des connaissances futures. Tout ce paragraphe a été retiré lors de la rédaction du manuel de 2017. Pour finir, ce même manuel titre le thème traitant de la physique nucléaire par « Radioactivité et énergie nucléaire ». Mais, à aucun moment dans le manuel, la notion « d'énergie nucléaire » n'est définie. Pourtant, cette expression est utilisée régulièrement dans les débats publics. Il aurait donc été intéressant de la définir, d'autant plus quand elle est utilisée dans le titre.

I.VI. Conclusion

En conclusion de ce complément d'analyse, plusieurs éléments ressortent. Tout d'abord, nous observons très peu de différences entre les deux manuels concernant le fond des savoirs enseignés. La plus grande différence est dans la forme, la présentation des contenus. L'accent est davantage mis sur la compréhension du fonctionnement d'une centrale nucléaire dans le manuel datant de 2003, au détriment des concepts purement théoriques. Ceux-ci sont davantage au centre dans le manuel de 2017 et ce dernier a opté pour un enchaînement de plus didactique.

Nous avons montré la présence de quelques erreurs et préconceptions dans les manuels analysés comme le concept d'énergie de liaison ou l'équivalence entre masse-énergie. Néanmoins, les manuels traitent et anticipent la majorité des conceptions erronées utilisées

dans cette étude et permettent d'inférer des raisonnements requérant une plus grande demande cognitive. En effet, la majorité des questions opératoires trouvent leur réponse dans ces derniers. Nous pouvons donc en conclure que ces manuels peuvent servir de soutien dans l'enseignement de la physique, mais qu'un regard d'expert est central pour ne pas propager les mêmes erreurs.

Au niveau des attentes du référentiel, le manuel de 2017 traitent davantage de notions et donnent aux élèves plus de clefs pour comprendre en profondeur la radioactivité et les processus nucléaires. Toutefois, nous constatons une absence des questions de société et des enjeux actuels, ceux-ci devraient pourtant être intégrés au centre des cours de sciences afin de permettre aux élèves de comprendre et d'agir sur le monde comme des scientifiques. Il est donc important de repenser ce manuel afin qu'ils utilisent ces questions socialement vives comme un fil conducteur pour la construction des savoirs. Cela permettrait aux élèves, mais également aux enseignant.e.s, d'ancrer les concepts dans le réel et de donner une dimension citoyenne au cours de sciences.

Pour ce qui est des perspectives, il nous semble pertinent d'élargir notre recherche à d'autres manuels scolaires actuels afin de prendre en considération l'ensemble des livres de référence belges francophones utilisés par les établissements scolaires. Nous pourrions ainsi mettre en lumière les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux pour permettre aux enseignant.e.s de faire un choix éclairé sur le manuel à utiliser dans leur classe et de l'adapter en fonction de leur contexte scolaire. Nous pouvons également étendre la période temporelle considérée en analysant des manuels plus anciens. Notre analyse n'a montré qu'une différence sur la forme des contenus abordés mais peu sur le fond. Si nous considérons des manuels encore plus anciens, il serait possible d'observer plus de différences de traitement entre les différentes notions liées à la physique nucléaire. Il serait donc enrichissant d'examiner plus de manuels scolaires actuels et de remonter davantage dans le temps grâce à l'analyse de manuels plus anciens.

Annexe II

Questionnaire vierge

Le but de la recherche à laquelle vous participez est d'analyser la compréhension des élèves sur la physique nucléaire. Le but de ce questionnaire n'est donc pas d'évaluer si les réponses sont bonnes ou pas, mais de comprendre les liens qui se font chez les étudiant.e.s. Ce questionnaire contient 24 questions et aborde de nombreux domaines autour de la physique nucléaire. Répondez aux questions le mieux possible. Merci d'avance pour le temps et l'énergie que vous prendrez afin de répondre à ce questionnaire.

1. La radioactivité est-elle un processus dangereux ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

2. Est-il dangereux de manipuler un matériau émettant un rayonnement α ?
Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

3. En ne considérant pas les risques d'explosion, est-il dangereux d'habiter près d'une centrale nucléaire ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

4. De nombreuses personnes reçoivent des radiations pour soigner leur cancer. Ces radiations sont-elles dangereuses pour la santé du patient ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

5. La radioactivité est-elle présente naturellement ou est-ce une invention humaine ?

.....

.....

.....

6. En Belgique, les habitants sont exposés à la présence du radon (un dérivé de l'uranium) dans les logements. Comment expliquez-vous la présence d'un élément radioactif dans les habitations ?

.....

.....

.....

7. L'uranium utilisé dans les centrales nucléaires, est-il présent naturellement ou est-il fabriqué artificiellement ?

.....

.....

.....

8. Le carbone 14 (^{14}C) est un élément radioactif utilisé comme "chronomètre" pour estimer l'âge d'objets retrouvés lors de fouilles archéologiques. Ce processus est appelé "la datation au ^{14}C ". Les archéologues manipulent le ^{14}C sans équipements particuliers. Pourquoi n'y a-t-il pas de protocoles de protection liés à la radioactivité du ^{14}C pour protéger les archéologues ?

.....

.....

.....

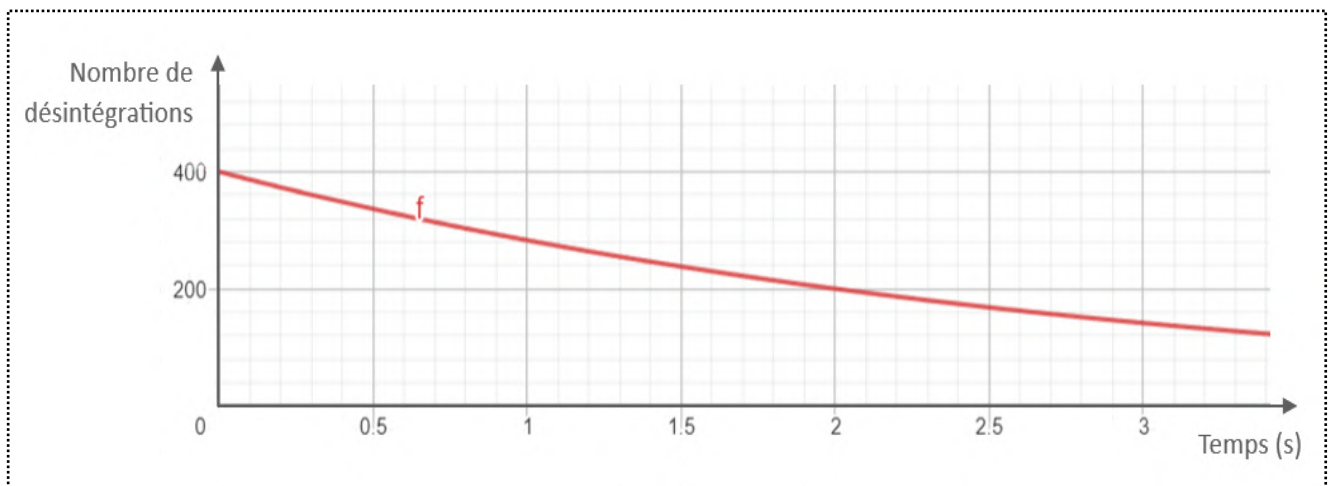
9. Lors de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl, une zone de plus de 4 800 km² a été évacuée. Les scientifiques estiment qu'il faut 48 000 ans avant que cette zone redevienne habitable. Comment expliquez-vous cette si longue période alors que l'accident a eu lieu en 1986 ?

.....
.....
.....

10. Dans le cas d'un accident nucléaire, peut-on accélérer le processus de désintégration radioactif ? Détaillez votre raisonnement.

.....
.....
.....

11. On relève l'activité d'un échantillon radioactif au cours du temps :



Déterminez graphiquement le temps de demi-vie de l'échantillon. De plus, que se passe-t-il après 4 secondes

.....
.....
.....

12. Est-ce qu'un objet radioactif reste radioactif pour toujours ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

13. D'où provient l'énergie émise lors d'une réaction nucléaire ?

.....

.....

.....

14. Pour faire fonctionner une centrale nucléaire, faut-il ajouter régulièrement de la matière première ou est-ce que l'entière de la matière première est placée dans la cuve du réacteur lors de sa fabrication ?

.....

.....

.....

15. En 1905, A. Einstein publia un article contenant l'équation $E = mc^2$. Que veut dire cette équation ?

.....

.....

.....

16. L'utilisation des centrales nucléaires est-elle une solution face à l'enjeu climatique actuel ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

17. Imaginons que l'on veuille construire un abri anti-nucléaire. Que doit-on prendre en considération ?

.....

.....

.....

18. Quelles sont les différences entre les 3 types de rayonnement : α , β et γ ?

.....

.....

.....

19. Porter des gants lors d'une manipulation avec des éléments radioactifs, est-ce une protection suffisante ? Détaillez votre raisonnement.

.....

.....

.....

20. Qu'est-ce que le rayonnement radioactif ?

.....

.....

.....

21. Quel(s) processus utilise-t-on dans les centrales nucléaires : la fission et / ou la fusion nucléaire ?

.....

.....

.....

22. Lorsqu'il y a une fission nucléaire, l'énergie libérée provient de la séparation d'un noyau en deux parties. Dans le cas de la fusion, l'énergie est libérée par la combinaison de deux noyaux. Ne serait-ce pas une contradiction ? Comment deux processus opposés peuvent-ils libérer de l'énergie ?

.....
.....
.....

23. Si l'on veut réaliser une réaction nucléaire à l'aide d'un noyau lourd, allons-nous privilégier la fission ou de la fusion nucléaire ?

.....
.....
.....

24. Expliquez comment la fission nucléaire a toujours réchauffée la Terre de l'intérieur et comment la fusion nucléaire a toujours réchauffé la Terre de l'extérieur.

.....
.....
.....

Annexe III

QR code vers les données



Bibliographie

- Acar Sesen, B. & Ince, E. (2010). Internet as a source of misconception: "Radiation and radioactivity". *Turkish Online Journal of Educational Technology*, 9(4), 94-100.
- Alsop, S. (2001). Living with and learning about radioactivity: A comparative conceptual study. *International Journal of Science Education*, 23(3), 263–281. <https://doi.org/10.1080/095006901750066510>
- Bardin, L. (1993). *L'analyse de contenu* (7e éd. Corr.). Presses universitaires de France.
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1994). Children's Ideas about Radioactivity and Radiation: sources, mode of travel, uses and dangers. *Research in Science & Technological Education*, 12(2), 145–160. <https://doi.org/10.1080/0263514940120204>
- Carvalho Jr, G. (2024). Les invariants opératoires dans le processus de conceptualisation en physique thermique. *Carrefours de l'éducation*, 57, 115-130. <https://doi.org/10.3917/cdle.057.0115>
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., & Wood-Robinson, V. (2015). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas* (Classic ed.). Routledge.
- Eijkelhof, H. M. C. (1990). *Radiation and risk in physics education* [Doctoral dissertation, University of Utrecht]. CDB Press. <https://inis.iaea.org/records/kaezk-7qr74>
- Eijkelhof, H. M. C., Klaassen, C. W. J. M., Lijnse, P. L., & Scholte, R. L. J. (1990). Perceived incidence and importance of lay-ideas on ionizing radiation: Results of a Delphi-study among radiation-experts. *Science Education*, 74(2), 183–195. <https://doi.org/10.1002/sce.3730740205>
- Hull, M. M., Jansky, A., & Hopf, M. (2020). Probability-related naïve ideas across physics topics. *Studies in Science Education*, 57(1), 45–83. <https://doi.org/10.1080/03057267.2020.1757244>
- Klaassen, C. W. J. M., Eijkelhof, H. M. C., & Lijnse, P. L. (1990). Considering an alternative approach to teaching radioactivity. Dans P. L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos, & A. J. Waarlo (Eds.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles: A central problem in secondary science education* (p. 304–315). CD-Beta Press.
- Kohnle, A., McLean, S., & Aliotta, M. (2011). Towards a conceptual diagnostic survey in nuclear physics. *European Journal of Physics*, 32(1), 55–62. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/32/1/006>

- Lijnse, P. L., Eijkelhof, H. M. C., Klaassen, C. W. J. M., & Scholte, R. L. J. (1990). Pupils' and mass-media ideas about radioactivity. *International Journal of Science Education*, 12(1), 67–78. <https://doi.org/10.1080/0950069900120106>
- Millar, R. (1994). School students' understanding of key ideas about radioactivity and ionizing radiation. *Public Understanding of Science*, 3(1), 53-70. <https://doi.org/10.1088/0963-6625/3/1/004>
- Morales López, A.I., Tuzón Marco, P. (2021). Misconceptions, Knowledge, and Attitudes Towards the Phenomenon of Radioactivity. *Science & Education*, 31, 405–426. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00251-w>
- Nakiboglu, C. & Tekin, B. B. (2006). Identifying Students' Misconceptions about Nuclear Chemistry. A Study of Turkish High School Students. *Journal of chemical education*. 83(11). 1712-1718. <https://doi.org/10.1021/ed083p1712>
- Neumann, S., & Hopf, M. (2013). Students' Ideas About Nuclear Radiation – Before and After Fukushima. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 9(4), 393-404. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2014.948a>
- OCDE (2016), Cadre d'évaluation et d'analyse de l'enquête PISA 2015 : Compétences en sciences, en compréhension de l'écrit, en mathématiques, en matières financières et en résolution collaborative de problèmes, édition révisée, PISA, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.178/9789264297203-fr>
- OpenAI. (2025). ChatGPT (version GPT-4.5) [Modèle d'intelligence artificielle]. <https://chat.openai.com>
- Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique* (1e éd., coll. Que sais-je ?). Presses Universitaires de France.
- Plaisance, É., & Vergnaud, G. (2012). *Les sciences de l'éducation* (5e éd. entièrement révisée et mise à jour). La Découverte. (Collection Repères sociologie)
- Plotz, T. (2016). Students' conceptions of radiation and what to do about them. *Physics Education*, 52, 1-6. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/52/1/014004>
- Plotz, T., & Hollenthoner, F. (2019). Replicating a study about children's drawings concerning radiation. *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences*, 6(1), 71–88. <https://doi.org/10.4995/muse.2019.10390>
- Plotz, T., & Hopf, M. (2016). Two concepts of radiation: A case study investigating existing preconceptions. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4(4), 447–459. <https://doi.org/10.30935/scimath/9484>

- Prather, E. (2005). Students' Beliefs About the Role of Atoms in Radioactive Decay and Half-life. *Journal of Geoscience Education*, 53(4), 345–354. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-53.4.345>
- Rathore, R. (2016). Surveying students' misconceptions and understanding in nuclear physics. *IOSR Journal of Applied Physics*, 8(1), 7–10. <https://doi.org/10.9790/4861-08110710>
- Reverdy, C. (2018) Les recherches en didactique pour l'éducation scientifique et technologique. *Dossier d'actualité de veille de l'IFÉ*, 122. Institut français de l'Éducation – ENS de Lyon. <https://veille-et-analyses.ens-lyon.fr/DA-Veille/122-fevrier-2018.pdf>
- Tsaparlis, G., Hartzavalos, S. & Nakiboğlu, C. (2013). Students' Knowledge of Nuclear Science and Its Connection with Civic Scientific Literacy in Two European Contexts: The Case of Newspaper Articles. *Science & Education*, 22(8), 1963–1991. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9578-5>
- Tsaparlis, G., Hartzavalos, S., Vlachas, V., Malamou, C., Neila, I., & Pantoula, C. (2020). Affective and cognitive outcomes of project-based teamwork in a model lower secondary school: The case of nuclear energy. *Science Education International*, 31(1), 52–64. <https://doi.org/10.33828/sei.v31.i1.6>
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(2-3), 133-170.
- Vygotski, L. (1997). *Pensée et langage* (édition française). La Dispute.

