

THESIS / THÈSE

MASTER EN BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET CELLULAIRE

Vivant, ADN et génétique

évolution des conceptions des élèves et pratiques des enseignants

Genet, Pauline

Award date:
2024

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

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

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

Take down policy

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



Faculté des Sciences

Vivant, ADN et génétique : évolution des conceptions des élèves et pratiques des enseignants

**Mémoire présenté pour l'obtention
du grade académique de master 120 en biochimie et biologie moléculaire et cellulaire**

Pauline GENET

Juin 2024

Université de Namur
FACULTE DES SCIENCES
Secrétariat du Département de Biologie
Rue de Bruxelles 61 - 5000 NAMUR
Téléphone: + 32(0)81.72.44.18 - Téléfax: + 32(0)81.72.44.20
E-mail : celia.defoin@unamur.be - <http://www.unamur.be>

Vivant, ADN et génétique : évolution des conceptions des élèves et pratiques des enseignants

Genet Pauline

Résumé

Le présent mémoire explore certains concepts fondamentaux de la biologie que sont le vivant, l'ADN et la génétique. Ceux-ci constituent des éléments centraux des programmes d'enseignement en Fédération Wallonie-Bruxelles, de l'école primaire jusqu'à la rhéto. Ces sujets, abordés tout au long du parcours éducatif, soulèvent des questionnements complexes tant chez les élèves que chez les enseignants et les scientifiques. Parmi ces interrogations, la définition de la vie se distingue comme un sujet particulièrement épineux, sans consensus établi au sein de la communauté scientifique. Une analyse de la littérature a révélé que les jeunes peinent à discerner clairement la frontière entre ce qui est vivant et ce qui ne l'est pas. Cette difficulté donne lieu à des réflexions erronées, telles que la croyance que l'ADN est lui-même vivant. De nombreuses autres idées préconçues à propos de l'ADN et de la génétique ont été relevées dans la littérature. La principale source évoquée de ces préconceptions est l'abondance d'informations pas toujours exactes sur ces thèmes dans les médias. Ce mémoire s'attache à identifier ces préconceptions chez les élèves de la Fédération Wallonie-Bruxelles, de la fin du primaire à la fin du secondaire, et à examiner leur évolution au fil de leur parcours scolaire. Il s'intéresse également aux conceptions des enseignants eux-mêmes et à leurs pratiques pédagogiques en réponse aux idées préétablies des élèves.

Mémoire de master 120 en biochimie et biologie moléculaire et cellulaire

Juin 2024

Promoteur: A. Vervoort

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Vervoort de m'avoir donné l'opportunité de faire mon mémoire au sein de l'URDB. J'ai eu la chance de pouvoir choisir un sujet qui me tenait particulièrement à cœur et j'ai vraiment apprécié approfondir cette thématique durant cette année sous sa guidance expérimentée.

Ensuite, je tiens à remercier Olivia Bleeckx qui m'a accordé du temps pour m'expliquer comment exploiter au mieux mes données. Son expertise en statistiques a été d'une grande valeur pour l'analyse pertinente des résultats.

De plus, je tiens également à remercier les enseignants qui ont accepté de collaborer avec moi pour me permettre de récolter des données.

J'adresse aussi mes remerciements à mes proches qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Enfin, je souhaite remercier le jury de mon mémoire pour avoir consacré un peu de son temps à la lecture et au décryptage de ce projet.

Table des matières

1. Introduction	5
1.1. Concepts théoriques et historiques de l'ADN	5
1.2. L'ADN dans l'enseignement : transposition didactique et programmes	9
1.3. Préconceptions : définition et principaux concepts erronés	12
1.4. Hypothèses et objectifs	15
2. Matériel et méthodes	16
2.1. Test préliminaire	17
2.2. Test en primaire	17
2.3. Test en secondaire	18
2.4. Analyse des données	20
2.5. Interviews des enseignants	21
3. Résultats	23
3.1. Test préliminaire	23
3.2. Évolution des conceptions de la fin des primaires à la fin des secondaires	23
Connaissance du concept de l'ADN et de sa localisation en primaire (QCM)	23
Localisation de l'ADN en secondaire (QO)	24
Utilisation ADN (QO)	24
Composition ADN (QO)	25
ADN vivant (QO)	26
Définition vivant en secondaire (QO)	26
Caractéristiques vivant (QCM)	27
Caractéristiques essentielles vivant (QCM)	28
QCM ADN	29
QCM génétique	30
3.3. Interviews des enseignants	31
Primaire	31
Premier degré	33
Troisième degré	34
4. Discussion	35
Test préliminaire	35
Identification et évolution des conceptions	36
Pratiques des enseignants	38
Notion du vivant	39
Concept entendu tôt	42
Aspect médiatique et esprit critique	42
La génétique dans les curriculum	44
5. Conclusion	45
6. Annexes	46
7. Bibliographie	49

1. Introduction

1.1. Concepts théoriques et historiques de l'ADN

Selon Le Robert, l'ADN (acide désoxyribonucléique) se définit comme un acide du noyau des cellules vivantes, constituant essentiel des chromosomes et porteur de caractères génétiques. Sur le site du National Human Genome Research Institute, il est également possible de lire que l'acide désoxyribonucléique est la molécule qui porte l'information génétique pour le développement et le fonctionnement d'un organisme. L'ADN est composé de deux brins liés qui s'enroulent l'un autour de l'autre pour ressembler à une échelle torsadée, une forme connue sous le nom de double hélice. Chaque brin a un squelette constitué d'une alternance de groupes sucre (désoxyribose) et phosphate. À chaque sucre est attachée l'une des quatre bases : adénine (A), cytosine (C), guanine (G) ou thymine (T). Les deux brins sont reliés par des liaisons chimiques entre les bases : adénine avec la thymine et cytosine avec la guanine. La séquence des bases le long du squelette de l'ADN code des informations biologiques, telles que les instructions pour fabriquer une protéine ou une molécule d'ARN (Travers and Muskhelishvili, 2015).

En 1869, Friedrich Miescher fut le premier à découvrir l'ADN. En effet, il avait extrait une substance blanche des noyaux de cellules humaines et du sperme de poisson. Il nomma alors cette substance nucléine puisqu'elle semblait associée au noyau. Plus tard, cette nucléine étant légèrement acide, on l'appela acide nucléique. La découverte de la structure de l'ADN en 1953 par les biologistes James Watson et Francis Crick a marqué un tournant dans la compréhension de l'hérédité et de l'évolution. Pour publier leur papier sur la structure hélicoïdale de l'ADN, Watson et Crick se sont largement inspirés des travaux de Rosalind Franklin qui a donc été la première à découvrir la structure de l'ADN (Klug, 1968). Ce modèle a directement suggéré que la complémentarité des bases était à l'origine de la reproduction de l'information génétique. La réplication correcte de l'ADN avant la division cellulaire étant cruciale, la séquence des brins parentaux doit être dupliquée dans les brins fils. Il faut donc que l'hélice parentale à deux brins donne deux hélices et quatre brins (Mason et al., 2017; Watson and Crick, 1953).

C'est ensuite en 1961, grâce à une expérience de Crick et Brenner, qu'il a pu être montré comment l'ordre des nucléotides d'une molécule d'ADN pouvait déterminer l'ordre des acides aminés d'une protéine. Ils ont pu démontrer que le code génétique est lu par trois nucléotides à

la fois, et que la lecture est continue, sans ponctuation entre les unités de trois nucléotides. Cela montre l'importance du cadre de lecture. En l'absence de ponctuation, le cadre de lecture établi par le premier codon de la séquence détermine la manière dont tous les codons suivants sont lus les uns après les autres. Plus tard, les 64 codons possibles ont pu être attribués aux différents acides aminés. Cependant, 3 de ces 64 codons sont des codons stop et ne spécifient donc pas des acides aminés. Il n'existe que 20 acides aminés, les 61 codons sont donc plus que suffisants. Malgré tout, ils sont tous utilisés. En effet, le code génétique est dégénéré, ce qui signifie que certains acides aminés sont spécifiés par plusieurs codons. De plus, une autre particularité du code génétique est qu'il est universel. Il est donc possible de transférer des gènes d'un organisme à un autre. Cette universalité de l'expression des gènes est au cœur de nombreux progrès du génie génétique (Crick et al., 1961; Mason et al., 2017).

Pour utiliser les informations génétiques dans la cellule, celles-ci doivent être transcrites en ARN. En effet, les protéines ne sont pas produites directement à partir de l'ADN, mais à partir de l'ARN, qui est une copie de l'ADN. L'ARN diffère de l'ADN par sa composition en ribose et l'utilisation de l'uracile au lieu de la thymine. De plus, l'ADN est généralement bicaténaire, tandis que l'ARN est monocaténaire. L'ADN stocke l'information génétique, tandis que l'ARN l'utilise pour synthétiser les protéines. La transcription de l'ADN en ARN permet donc à la cellule de faire la distinction entre la molécule dépositaire du message originel et celle qui en est une copie (Mason et al., 2017).

L'histoire fascinante de la génétique ne s'arrête pas à la simple transcription de l'ADN en ARN et à la synthèse des protéines. Il y a un autre chapitre tout aussi crucial à explorer, celui du génome non codant, longtemps sous-estimé et qualifié de « junk DNA ». En 2012, dans le cadre du projet Encyclopedia of DNA Elements (ENCODE), 30 articles ont été publiés dans les revues scientifiques les plus estimées et ont enterré l'idée que notre ADN était principalement composé de bases inutiles. Ce projet qui a duré plus de 10 ans a permis de mettre en évidence que 80% de notre génome avait une fonction sur le plan biochimique (Pennisi, 2012). Les critères pour définir un élément fonctionnel étaient que la séquence devait coder pour un produit défini (protéines ou ARN non codant) ou présenter une signature biochimique reproductible (“An Integrated Encyclopedia of DNA Elements in the Human Genome,” 2012). Le génome est donc également composé de différents ADN non codants, comme des introns, ou des sites de régulations, mais aussi des régions codant pour des ARN non codants (ARN ribosomiques, ARN de transfert, ...). Certains de ces ARN non codants, comme les microRNA,

agissent comme des régulateurs de l'expression d'autres gènes. En 1998, Fire et Mello ont été les premiers à décrire les mécanismes d'interférence par ARN. Leurs expériences ont montré que l'utilisation d'ARN double brin induisait une répression de l'expression du gène de l'ordre de 10x supérieure à celle obtenue en utilisant un ARN antisens unique. Les microRNA sont de petits ARN non codants capables de moduler l'expression des gènes au niveau post-transcriptionnel, soit en inhibant la traduction de l'ARN messager (ARNm), soit en favorisant la dégradation de l'ARNm. L'issue de beaucoup de processus physiologiques et de pathologies, y compris le cancer, les maladies cardiovasculaires et métaboliques, dépend fortement des microRNA (Correia de Sousa et al., 2019).

Même si notre connaissance du génome humain a connu de grandes avancées, des défis plus fondamentaux persistent, tels que la définition même de la vie. La frontière entre ce qui est vivant et les molécules qui le composent n'est pas toujours nette (Witzig et al., 2013). D'ailleurs, l'ADN, une molécule essentielle à la vie, est souvent mal interprété comme étant vivant. Cela démontre la nécessité de définir précisément ce qu'est la vie. Cependant, il semble qu'il n'existe pas de définition simple et universelle (Mason et al., 2017). La plupart du temps la vie est définie sur base de critères dans les livres de référence (Campbell, 2020). C. De Ron (2022) a analysé à la fois des livres de référence, des manuels de l'enseignement secondaire mais aussi des sites internet afin de mettre en avant les critères suggérés pour un être vivant. Il a été montré que ces ressources ne possédaient pas toutes les mêmes critères. Néanmoins, il en est ressorti que les quatre critères les plus cités sont le fait d'être d'abord composé de cellules, puis de pouvoir évoluer, d'être capable également de produire sa matière vivante et enfin de se reproduire.

Au niveau de l'enseignement secondaire, dans les référentiels et programmes du premier degré, on retrouve une définition des êtres vivants qui met l'accent sur leurs caractéristiques principales. Selon cette approche, les êtres vivants se distinguent par leur capacité à réagir aux stimuli, qu'ils proviennent de modifications du milieu physique (telles que la diminution de la luminosité) ou des signaux émis par d'autres êtres vivants (comme les sons ou les odeurs). De plus, ils sont capables de se reproduire et d'échanger de la matière, telle que l'eau, l'air et la nourriture. Pour finir, il est noté que les représentations mentales des élèves concernant le concept de "vivant / non-vivant" sont variées et souvent sujettes à de multiples approximations et erreurs. Il est donc souligné l'importance, pour les enseignants, de déconstruire ces

préconceptions et de reconstruire de nouvelles perspectives sur une base scientifique rigoureuse (“WBE,” 2014).

Les efforts didactiques concernant l’ADN et la génétique sont nécessaires, car il est essentiel de former les jeunes dans ce domaine en expansion. Depuis la découverte de Friedrich Miescher, de nombreuses avancées ont eu lieu dans le domaine de la biologie moléculaire et ont permis de mieux comprendre les mécanismes de l'expression génétique, la régulation des gènes et les interactions entre les différents niveaux d'organisation de l'ADN dans les cellules et les organismes. Aujourd'hui, l'ADN est utilisé dans diverses applications en biotechnologie, comme le clonage, la manipulation génétique, la production de protéines recombinantes, la médecine génomique et la biologie synthétique (Mason et al., 2017).

Une découverte majeure récente est CRISPR-Cas9. Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna ont obtenu le prix Nobel de chimie en 2020 pour avoir mis au point l'édition génétique basée sur la technologie CRISPR-Cas9. Il s’agit d’une technique de modification génétique qui permet aux scientifiques de cibler et d’éditer des gènes spécifiques dans l'ADN. Elle repose sur une enzyme appelée Cas9, qui agit comme une "paire de ciseaux moléculaires" pour couper l'ADN à des endroits précis. Les scientifiques peuvent alors ajouter, supprimer ou remplacer des séquences d'ADN dans le génome de l'organisme. La technologie CRISPR-Cas9 a des applications potentielles dans de nombreux domaines, notamment la médecine et l'agriculture. En médecine, elle pourrait être utilisée pour traiter ou prévenir des maladies génétiques en corrigeant les mutations responsables de la maladie. Des chercheurs ont déjà mis au point des mécanismes basés sur des lipides pour délivrer la technologie CRISPR chez les patients atteints de la dystrophie musculaire de Duchenne (Kenjo et al., 2021). Dans l'agriculture, elle est déjà utilisée pour développer des plantes et des animaux plus résistants aux maladies. La modification ciblée CRISPR-Cas9 des gènes de sensibilité chez les espèces cultivées telles que le riz, la tomate et le blé peut conférer à ces plantes une résistance aux maladies fongiques et bactériennes (Borrelli et al., 2018).

Encore plus récemment, ce 23 août 2023, Hallast *et al.* (2023) ont réussi à assembler et à analyser les chromosomes Y de 43 hommes, offrant des informations sur leurs différences génétiques. Il s’agit d’une découverte scientifique majeure car, jusqu’à ce jour, le chromosome Y n’avait pas pu être séquencé dans son intégralité. Cette étude, publiée dans Nature, fait progresser de manière significative notre compréhension des régions non recombinantes du

génomique, de la stabilité génétique et de l'intégrité chromosomique, offrant ainsi des informations sur la variation génétique et l'évolution humaine.

1.2. L'ADN dans l'enseignement : transposition didactique et programmes

Toutes ces découvertes et ces applications font de la génétique un enjeu scientifique crucial qu'il convient d'enseigner aux élèves afin de leur donner une compréhension de base des principes de la génétique et de l'expression génétique. Cette connaissance est non seulement importante pour leur formation scientifique, mais aussi pour leur compréhension du monde qui les entoure et de leur propre nature en tant qu'êtres vivants. La compréhension de la génétique passe inévitablement par l'étude de la molécule d'ADN, qui est le support de l'information génétique. Cependant, tout le savoir scientifique qui concerne l'ADN et donc la génétique ne peut pas être repris et devenir objet d'enseignement. Par conséquent, la Fédération Wallonie Bruxelles (FWB), lors de l'établissement des référentiels, choisit ce qui va être enseigné aux élèves, parmi toutes les connaissances scientifiques. Ceux-ci seront, ensuite, traduits en programmes par les différents réseaux d'enseignement. Ces programmes permettent d'atteindre les compétences fixées par le Gouvernement ("Enseignement.be," n.d.). La conception des curriculum d'enseignement implique un choix minutieux des connaissances à transmettre, ce qui constitue une opération délicate (Soetewey et al., 2011; Tall, 1989). En plus de poser ce choix, les rédacteurs des référentiels réalisent également la transposition didactique externe.

La transposition didactique est le travail de transformation des connaissances savantes en connaissances à enseigner dans les manuels, puis en connaissances à enseigner dans les salles de classe (BienEnseigner, 2022). Le terme de « transposition didactique » a été pour la première fois utilisé par Yves Chevallard dans son livre intitulé « La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné » (Colomb, 1986). Cependant, c'est en 1975 que Michel Verret a introduit ce concept. Il a alors mis en évidence quatre constantes qui caractérisent l'action de transposer en didactique. Tout d'abord, il y a la désynchronisation du savoir, c'est-à-dire délimiter les savoirs et les organiser. Ensuite, il y a la dépersonnalisation qui consiste à détacher le savoir des personnes desquelles il provient. Cependant, en sciences, il est assez fréquent d'associer la théorie au nom de la personne qui l'a développée. Par exemple, en biologie, la théorie de l'évolution est inévitablement rattachée à Darwin. En physique, il est question des lois de Newton et, en chimie, le modèle de Bohr est également enseigné. Cette

approche n'est donc pas tout à fait applicable ici. Vient ensuite la programmation des apprentissages qui consiste à choisir dans quel ordre les différents enseignements seront transmis et enfin la publicité du savoir. Cette dernière étape reprend toutes les étapes de finalisation dans les manuels scolaires. La transposition réalisée dans le référentiel est qualifiée d'« externe » car elle n'est pas comprise dans l'institution : le choix de ce qui va être enseigné se fait en amont. Par opposition, la transposition didactique interne est celle qui s'opère au sein de l'école et qui permet le passage du savoir à enseigner des référentiels au savoir enseigné dans les classes (Marandola and Fierz, 2017). Selon Paun (2006), la transposition didactique pourrait être confondue avec de la vulgarisation scientifique. Cependant, ce sont deux choses bien distinctes. En effet, la vulgarisation scientifique vise à rendre le savoir savant plus accessible et attractif au grand public quitte à sacrifier la rigueur scientifique. En revanche, lors de la transposition didactique, le but est de conserver au maximum cette rigueur scientifique tout en la rendant plus accessible. Le savoir scientifique va donc être remanié et cette transposition sera donc source de nombreuses transformations voulues ou non (Perrenoud, 1998).

Une fois la transposition didactique externe réalisée, des programmes pour les différents réseaux d'enseignement sont obtenus. Il est possible de voir que l'entrée vers la génétique et le concept d'ADN se fait en quatrième secondaire. Au niveau du référentiel de sciences de base de l'enseignement secondaire ordinaire en Fédération Wallonie-Bruxelles, l'enseignement du concept de l'ADN s'insère dans l'UAA3 : « unité et diversité des êtres vivants ». Plusieurs processus doivent être développés :

- mettre en évidence les ressemblances (moléculaires, cellulaires) entre les êtres vivants,
- expliquer que la molécule d'ADN contient l'information génétique,
- expliquer l'universalité et la variabilité de l'ADN,
- émettre une première explication sur la manière dont les espèces évoluent (sélection naturelle), à partir de l'observation des modifications de la biodiversité au cours du temps.

A la fin de cette unité d'acquis d'apprentissage, l'élève doit avoir acquis certains savoirs et savoir-faire au sujet de l'ADN et de la génétique comme, par exemple, réaliser une représentation schématique de la molécule d'ADN (échelle torsadée) ou encore résoudre un problème simple de monohybridisme. Dans la rubrique « considérations pédagogiques » du programme de sciences de base en Fédération Wallonie-Bruxelles, les enseignants sont invités à aborder l'ADN en parlant des différentes molécules composant le vivant et ainsi en arriver

aux acides nucléiques qui composent l'ADN. Ensuite, l'universalité de la molécule d'ADN est abordée en décrivant une expérience de transgénèse. Par la suite, l'enseignant est amené à décrire le cycle cellulaire, la notion de caryotype, la méiose et enfin le monohybridisme (WBE 2014). Le programme de l'enseignement catholique exige également que l'élève soit capable d'expliquer que l'ADN contient l'information génétique, ainsi que son universalité et sa variabilité. Afin d'atteindre ces objectifs, l'élève doit pouvoir représenter l'ADN, décrire une expérience de transgénèse, établir le lien entre chromosomes, ADN et information génétique ou encore identifier les origines des mutations (FESeC 2014).

Ce passage vers la quatrième secondaire peut s'avérer compliqué car l'enseignement se concentre sur un niveau d'organisation beaucoup plus abstrait (Dahmani and Schneeberger, 2011). Pourtant, même avant cette année, les élèves ont déjà été initiés à certains concepts abstraits lors de leurs cours de chimie en découvrant, notamment, le concept de molécule et d'atome en troisième secondaire. Cependant, les cours de biologie au niveau de la quatrième secondaire marquent une transition significative, car ils nous emmènent au-delà des concepts manipulables et visibles à l'œil nu qui ont été au cœur des apprentissages jusqu'à présent. Par exemple, en troisième secondaire, l'UAA1 se concentre sur la nutrition et la digestion des aliments ainsi que sur la production d'énergie chez les hétérotrophes à l'alimentation équilibrée. Dans cette UAA, l'étude des nutriments est également abordée et entraîne inévitablement une entrée vers le niveau moléculaire. Cependant, les élèves peuvent facilement comprendre ce concept car il peut souvent être contextualisé avec des expériences quotidiennes liées à la nourriture et à la digestion. Les élèves peuvent avoir des références concrètes pour comprendre les molécules impliquées. L'UAA2 parle de l'importance des végétaux au sein des écosystèmes. La différence entre les concepts vus en quatrième secondaire et ceux vus en troisième est donc bien le niveau d'organisation auxquels ils appartiennent. À ce sujet, Marbach-Ad et Stavy ont développé, en distinguant les différents niveaux d'organisation, le niveau macroscopique, le niveau microscopique et le niveau moléculaire. Le macroscopique reprend tout ce que l'on peut manipuler et qui est visible à l'œil nu tandis que le microscopique n'est visualisable qu'au moyen d'un microscope. Le passage du macroscopique au microscopique constitue déjà une difficulté pour les étudiants. Plusieurs études ont révélé qu'ils ne parviennent pas à définir le vivant à cette échelle (De Ron, 2022; Witzig et al., 2013). Le niveau moléculaire, quant à lui, est tout à fait abstrait car souvent impossible à visualiser. L'apprentissage de l'ADN en quatrième année peut donc constituer un palier car il s'agit d'une entrée vers le niveau moléculaire et l'abstrait (Marbach-Ad and Stavy, 2010).

Les difficultés citées précédemment portent sur l'aspect structurel de l'ADN mais, comme le soulignent Dahmani et Schneeberger (2011), il doit également être envisagé sur son aspect fonctionnel avec la génétique. Duncan et Reiser (2007) remarquent également que la génétique moléculaire pose problème aux élèves et expliquent qu'il existe deux raisons à cela. Tout d'abord, les élèves rencontrent des difficultés car les phénomènes génétiques peuvent s'avérer à la fois invisibles et inaccessibles, donc assez abstraits. Ensuite, la seconde raison est que la génétique s'étend sur de nombreux niveaux d'organisation (gènes, protéines, tissus, organes, etc.). Cela rejoint Marbach-Ad et Stavy qui ont également mis en évidence que, lorsque les concepts d'un sujet étaient étalés sur différents niveaux d'organisation, les élèves pouvaient rencontrer plus d'incompréhensions. La génétique pourrait donc être source de confusion chez certains élèves (Marbach-Ad and Stavy, 2010). Au Pays-Bas, Knippels *et al.* (2010) perçoivent également que les élèves ne différencient pas bien les niveaux moléculaire, cellulaire, organisme et population. Ils suggèrent alors de ne pas négliger les liens entre les différents niveaux. En effet, il faut éviter de passer de manière implicite d'un niveau à l'autre. Ils ont aussi remarqué que certains manuels néerlandais ne prêtaient pas assez attention à ces liens. Aussi, Knippels *et al.* proposent de pousser les élèves à explorer les relations entre les différents niveaux d'organisation en biologie, d'eux-mêmes, guidés par des activités d'apprentissage ou par l'enseignant.

1.3. Préconceptions : définition et principaux concepts erronés

Une des hypothèses pouvant expliquer les difficultés rencontrées par les élèves lors de l'apprentissage du concept d'ADN et de génétique est que les élèves n'arrivent pas sans aucune connaissance sur le sujet. En effet, Piaget (1995) a démontré que l'enfant possède déjà des conceptions qu'il a acquises grâce aux expériences qu'il a vécues. Selon Ayrinhac et Bru (2019), avant, l'enseignant pensait que l'élève démarrait avec une tête vide qu'il fallait alors remplir de connaissances mais cette vision est maintenant dépassée. Ces conceptions ou idées préconçues que l'enfant possède déjà sont appelées préconceptions (Morin, 2016). Selon Giordan et De Vecchi, une préconception est « une structure de pensée sous-jacente qui est à l'origine des actions de l'élève. Le jeune comprend le monde à travers elle. Ce n'est pas ce que l'élève pense, dit ou écrit, il s'agit du fruit de son expérience antérieure, sa grille de lecture et d'interprétation de la réalité. C'est un processus personnel, par lequel un apprenant structure au fur et à mesure les connaissances qu'il intègre » (Giordan and Vecchi, 1994). En d'autres termes, une préconception est la perception de concepts par les élèves d'une manière différente

de leurs définitions scientifiquement acceptées (Ke and Kaya, 2007). Pelle *et al.* (2016) citent Gaston Bachelard qui parle d'« obstacle épistémologique ». Il s'agit, selon lui, de « changer de culture expérimentale et de renverser les obstacles accumulés par la vie quotidienne » (Bachelard, 1993). En effet, ces conceptions sont souvent un frein à l'apprentissage. Le fait de les connaître permet donc à l'enseignant de les anticiper, d'adapter ses méthodes de travail et de construire des activités qui permettent de déstabiliser ces idées ou de les faire évoluer en vue d'acquérir de nouvelles connaissances (Pelle et al., 2016). Ayrinhac et Bru (2019) suggèrent que l'enseignant doit prendre en compte ces préconceptions et s'y appuyer afin de construire de nouveaux savoirs.

Pour comprendre comment ces préconceptions apparaissent, Reverdy (2018) et Clément (1991) ont suggéré qu'elles étaient influencées par le savoir scolaire antérieur, l'environnement, les croyances religieuses mais aussi les sources textuelle, documentaire ou encore audiovisuelle. Comme le soulignent Ayrinhac et Bru (2019), aujourd'hui, les enfants passent de plus en plus de temps sur les écrans. Selon Allain (1995), les sources médiatiques et audiovisuelles influencent davantage les enfants que les autres sources d'information car ces derniers sont marqués par des images spectaculaires. Justement l'ADN est devenu un sujet courant dans les médias, aussi bien dans le journal télévisé que dans certaines séries. En conséquence, les élèves peuvent avoir des idées préconçues sur l'ADN alors qu'ils n'ont pas encore reçu de cours à ce sujet. En effet, en France, Saavedra *et al.* constatent que les élèves ont une vision trop médiatisée de l'ADN, souvent due aux séries policières. Il est fréquent que les élèves considèrent qu'un profil ADN peut donner des informations, précises et totalement fiables, sur l'apparence externe ou sur les hypothétiques maladies génétiques d'une personne. Une autre idée préconçue, tirée des séries policières, est le fait de penser que toute la séquence d'ADN d'une personne est répertoriée dans une base de données (Saavedra et al., 2013). L'enseignant doit donc gérer ces préconceptions qui peuvent constituer un obstacle à l'apprentissage riche de sens (Sommeillier and Robert, 2018).

La vision très « médiatique » n'est pas la seule préconception qui a été relevée chez les élèves. En effet, une autre étude menée par Witzig *et al.* en 2013 aux États-Unis s'est intéressée aux conceptions que des étudiants de première année de l'enseignement supérieur avaient de l'ADN dans le cadre d'un cours de biochimie générale. Ce cours était destiné à des étudiants provenant de différentes branches allant de l'économie agricole à la gestion de l'hôtellerie et de la restauration, en passant par le journalisme et les sciences végétales et animales. Les résultats

ont montré que les étudiants conçoivent à 63% que l'ADN est vivant simplement parce que cette molécule est présente dans toutes les formes de vie (Witzig et al., 2013). C. De Ron (2022) a pu confirmer ces chiffres en pointant du doigt que 60% des étudiants littéraires de bloc 1 décrivent l'ADN comme vivant. Ce chiffre est en baisse pour les étudiants de bloc 1 en biologie qui décrivent la molécule comme vivante à 31%.

En plus de leurs préconceptions concernant la molécule supportant l'information génétique, les élèves ont également des difficultés avec le concept de gène. Plusieurs études se sont attardées sur ce sujet. Marzin-Janvier (2015) propose trois types de conceptions du gène en se basant sur Lhoste et Roland (2011C).

Tout d'abord, il y a la conception matérielle de l'information génétique du gène. La difficulté est que le concept de gène est attaché à la fois à une entité physique et à une entité d'information. Dahmani et Schneeberger mettent d'ailleurs en évidence que les élèves ont très souvent tendance à voir l'ADN davantage sous son aspect structurel que fonctionnel, ils ont donc très peu de connaissances en ce qui concerne le codage pour les différentes protéines (Dahmani and Schneeberger, 2011).

Ensuite, il y a la conception mécaniste de l'information génétique et du gène appelée aussi conception "gène particule". C'est une manière de voir les gènes comme de petites unités indépendantes, un peu comme des particules. Selon cette idée, chaque gène serait responsable d'un seul caractère physique chez un individu. Par exemple, un gène spécifique serait associé à la couleur des yeux ou à la taille. Cette conception simpliste ne prend pas en compte le fait que les gènes travaillent ensemble de manière complexe pour influencer nos caractéristiques physiques. En réalité, les gènes sont interdépendants et agissent en réseau. Ils peuvent influencer plusieurs caractères à la fois et leur expression dépend souvent d'interactions complexes avec l'environnement. Ainsi, la conception "gène particule" ne rend pas compte de la réalité de la génétique, où les gènes sont comme des pièces d'un puzzle qui interagissent les uns avec les autres pour former un tableau complet de nos caractéristiques physiques. Lewis et Kattmann se sont intéressés à des élèves anglais et allemands (15-18 ans). Ces élèves se représentent les gènes comme de petites entités qui contiennent des caractères. Ils considèrent donc gènes et caractères comme équivalents, il n'y a pas de distinction claire entre le génotype et le phénotype (Lewis and Kattmann, 2004).

Pour finir, il y a la conception fonctionnelle du gène et de l'information génétique qui est associée à la notion de programme génétique. Plusieurs études confirment que les élèves ne parviennent pas à reconnaître les connexions entre gènes et protéines et la participation de ces

dernières aux phénomènes d'expression génétique (Duncan & Reiser, 2007 ; Duncan et al., 2011 ; Duncan & Tseng, 2011 ; Tsui & Treagust, 2010).

Machová et Ehler (2021) ont également fait une étude sur les préconceptions des élèves du troisième degré en République Tchèque. Il en est ressorti qu'ils pensent que les différents types cellulaires, qui ont des fonctions distinctes (cellules musculaires, cellules sanguines, ...), nécessitent différents ADN. Une autre préconception commune est que le noyau est considéré comme le cerveau de la cellule (Machová and Ehler, 2021; Marbach-Ad and Stavy, 2010). Les élèves présentent également des difficultés concernant les mécanismes sous-jacents de l'hérédité. Les auteurs précisent, qu'à l'ère de la génétique, les élèves ne peuvent pas la voir comme une boîte noire.

Il n'y a pas que les élèves qui possèdent des conceptions erronées. Plusieurs études ont montré que les enseignants en possédaient également. M. Gooday (1996) a montré que les instituteurs partageaient un grand nombre de préconceptions avec leurs élèves. Par exemple, ils exprimaient des difficultés à faire le lien entre photosynthèse et nutrition des plantes. Une autre étude se concentrant sur les conceptions en sciences d'enseignants stagiaires, du primaire et du secondaire a montré des résultats similaires. Il en ressort, par exemple, que la moitié des stagiaires ont ajouté des propriétés macroscopiques à des particules microscopiques (Kikas, 2004).

1.4. Hypothèses et objectifs

Après lecture de la littérature, plusieurs hypothèses peuvent être formulées. Tout d'abord, les élèves développent des préconceptions concernant l'ADN et la génétique dès leur plus jeune âge. Ensuite, ces représentations sont influencées par une multitude de sources d'information telles que les séries télévisées et les médias sociaux. Enfin, nous pouvons également supposer que ces conceptions évoluent au fil de leur parcours scolaire façonnées par les pratiques de leurs enseignants.

Les objectifs de ce mémoire sont multiples. Dans un premier temps, ce travail s'articule autour de l'identification et de l'évolution des conceptions des élèves concernant le vivant, l'ADN et la génétique. Dans un second temps, il se concentre sur l'évaluation des conceptions des enseignants et de leurs pratiques pour aborder et corriger ces conceptions erronées.

2. Matériel et méthodes

Pour ce travail, différents questionnaires adaptés aux différents niveaux d'enseignement ont été développés. En effet, des questionnaires spécifiques ont été conçus pour la cinquième et sixième primaire, le premier degré et le troisième degré de l'enseignement secondaire. Le choix de ces deux niveaux d'enseignement a été effectué pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ces niveaux représentent des moments clés dans le parcours éducatif des élèves, où ils commencent à être exposés à des concepts scientifiques plus complexes. La notion du vivant est abordée dès la fin du primaire et en première secondaire alors que l'ADN est vu en quatrième secondaire. Ensuite, cela nous permet de couvrir une gamme d'âges et de niveaux de développement cognitif, ce qui nous donne une perspective plus complète sur les préconceptions des élèves à différents stades de leur éducation.

Cette approche permettra d'évaluer l'état des préconceptions des élèves, à la fois avant et après avoir reçu un enseignement sur l'ADN, ainsi que d'observer l'évolution de leurs connaissances et perceptions suite à l'enseignement dispensé.

Les élèves qui ont été interrogés proviennent de différentes écoles situées en Wallonie (Tableau 1). Les écoles ont été sélectionnées en fonction de la facilité d'accès aux enseignants, notamment ceux agissant en qualité de maîtres de stage pour l'Agrégation de l'Enseignement Supérieur (AESS), ainsi que des connaissances personnelles établies.

Tableau 1. Tableau reprenant le nombre d'élèves par niveau et les écoles dont ils proviennent.

Degré	École	Classe	Nombre d'élèves	Total
Primaire	École fondamentale libre Notre Dame de Jumet	5 ^{ème}	22 et 21 élèves	81 élèves
		6 ^{ème}	20 et 18 élèves	
Premier degré	Institut Saint Boniface d'Ixelles	1 ^{ère}	24 élèves	81 élèves
		2 ^{ème}	23 élèves	
	Institut de la Providence-Humanité à Gosselies (GPH)	1 ^{ère}	19 élèves	
		2 ^{ème}	15 élèves	
Troisième degré	Athénée Royale d'Izel	5 ^{ème}	15 élèves	71 élèves
	Collège Notre-Dame de Basse-Wavre		22 élèves	
	Collège Saint-Michel de Gosselies	6 ^{ème}	18 élèves	
	Institut Saint-Boniface d'Ixelles		16 élèves	

2.1. Test préliminaire

Initialement, un test préliminaire (Annexe 1) a été mené au niveau primaire dans le but de calibrer le questionnaire final, mais aussi de détecter à partir de quel âge les élèves sont capables de s'exprimer sur la notion d'ADN. Ce dernier a été organisé dans le courant du mois de juin 2023. Celui-ci a été effectué dans sept classes allant de la troisième à la sixième de l'école primaire de Marbais. Cette école est située au cœur du village de la commune de Villers-la-ville. Vu sa localisation géographique dans une commune privilégiée du Brabant wallon et sa proximité avec une cité, cette école présente une mixité sociale élevée. Un questionnaire anonyme a été distribué aux élèves avec des questions ouvertes visant à comprendre leur définition du vivant et à relever leurs préconceptions au sujet de l'ADN.

2.2. Test en primaire

Suite à ce questionnaire préliminaire, seules les classes de 5^{ème} et 6^{ème} primaire ont été sondées en proposant les questions sous forme de choix multiples (QCM) dont les propositions présentées ont été sélectionnées grâce au pré-test initial. Ce test a permis d'évaluer la compréhension des élèves et de déterminer quelles propositions étaient les plus pertinentes et les mieux adaptées pour évaluer les préconceptions des élèves concernant la molécule d'ADN. Lors de la présentation des résultats et leur analyse, nous ferons référence à chaque question par une courte description reprise entre parenthèse ci-dessous.

- Un être vivant : (Caractéristiques vivant)

- | | |
|---|--|
| ☐ Mange et boit | ☐ Respire |
| ☐ Bouge | ☐ Ressent des émotions |
| ☐ Se reproduit | ☐ Est capable de s'adapter (évoluer) |
| ☐ Pense | ☐ Est un ensemble de cellules |
| ☐ Possède différents organes | ☐ Contient de l'ADN |
| ☐ Grandit | ☐ Est capable de ressentir la douleur |

- As-tu déjà entendu parler d'ADN ? OUI – NON (entoure la bonne réponse)
(Connaissance concept ADN)

- Coche les propositions qui te semblent vraies à propos de l'ADN. (QCM ADN)

- ☐ Il est vivant car il fait lui-même partie du vivant.

- ☐ Certains êtres vivants n'ont pas besoin d'ADN.
 - ☐ Il est présent dans toutes les cellules.
 - ☐ Il est impossible de vivre sans ADN.
 - ☐ L'ADN et les empreintes digitales, c'est la même chose.
 - ☐ On ne trouve de l'ADN que chez les êtres vivants animés (ex : il n'y a pas d'ADN dans une noisette).
 - ☐ L'ADN peut être extrait d'un animal mort congelé dans la banquise arctique.
- Est-ce que tu sais où on peut trouver de l'ADN ? Coche les réponses qui te semblent vraies. (Localisation ADN)
 - ☐ Empreintes digitales (sur les doigts ou main)
 - ☐ Sang
 - ☐ Bouche ou salive
 - ☐ Cheveux
 - ☐ Dans nos cellules
 - ☐ Peau
 - As-tu déjà participé à des activités scientifiques ? Si oui, lesquelles ? (Printemps des Sciences, Anniversaire avec Cap Sciences) (Activités extrascolaires)

2.3. Test en secondaire

Un double questionnaire a été distribué en école secondaire dans les classes de première et deuxième année ainsi que dans les classes de cinquième et sixième année en sciences de base, visant à interroger des élèves n'ayant pas encore reçu d'enseignement sur l'ADN et ceux qui viennent de le recevoir. Chaque élève reçoit successivement deux questionnaires. Le premier présente des questions ouvertes alors que le second est sous forme de QCM. Tous deux interrogent sur des thématiques identiques. Ce format en deux phases vise d'abord à recueillir les préconceptions des élèves sans les influencer, puis à examiner plus précisément leurs préconceptions spécifiques.

La première consigne ouverte du questionnaire « Définis avec tes mots la notion d'être vivant » permet d'établir comment ils comprennent ce concept. Cette question va de pair avec la question n°3 « L'ADN est-il un composé vivant ? ». En combinant ces deux questions, il est possible de comprendre s'il y a des préconceptions liées au statut vivant/non-vivant de l'ADN, d'où elles viennent et de relever des incohérences dans le raisonnement des élèves. La question n°2 porte sur la localisation de l'ADN et permet de relever des conceptions erronées plus générales au sujet de la molécule d'ADN. La quatrième question ouverte permet d'estimer si

les élèves ont une vision trop « médiatique » de l'ADN. Une cinquième et dernière question ouverte est posée uniquement aux élèves du troisième degré et se concentre sur la structure de l'ADN en permettant de voir ce que les élèves ont retenu de leur cours de quatrième. Les questions fermées visent à mettre en évidence les mêmes préconceptions sauf la dernière qui s'attarde davantage sur la génétique afin de montrer les difficultés des élèves au sujet du concept de gène.

Questionnaire 1

- Définis avec tes mots la notion d'être vivant. (Définition vivant)
- Où peut-on trouver de l'ADN ? (Localisation ADN)
- L'ADN est-il un composé vivant ? OUI – NON (entoure ta réponse) (ADN vivant)
Justifie ta réponse.
- Pourquoi l'ADN peut-il être utilisé pour résoudre des problèmes d'identification, tels que les tests de paternité ou les enquêtes criminelles ? (Utilisation ADN)
- Quelles sont les principales composantes de la structure de l'ADN ? ¹ (Composition ADN)

¹ Cette question est uniquement présente dans le questionnaire destiné aux élèves du D3.

Questionnaire 2

- Un être vivant : (Caractéristiques vivant)

☐ Mange et boit	☐ Respire
☐ Bouge	☐ Ressent des émotions
☐ Se reproduit	☐ Évolue
☐ Pense	☐ Est un ensemble de cellules
☐ Possède différents organes	☐ Contient de l'ADN
☐ Grandit	☐ Possède un système nerveux
- Après avoir coché les cases, souligne une ou quelques propositions qui à elle(s) seule(s) permet(tent) de caractériser ce qui est vivant. (Caractéristiques essentielles vivant)
- Si tu as coché la case « Respire », explique en quelques mots ce qu'est la respiration. (Respiration)

- Coche les affirmations correctes au sujet de l'ADN. (QCM ADN)
 - ☐ Il est vivant car il fait lui-même partie du vivant.
 - ☐ Certains êtres vivants n'ont pas besoin d'ADN.
 - ☐ Il est présent dans toutes les cellules.
 - ☐ Il est impossible de vivre sans ADN.
 - ☐ ADN et empreintes digitales sont synonymes.
 - ☐ On ne trouve de l'ADN que chez les êtres vivants animés (ex : il n'y a pas d'ADN dans une noisette).
 - ☐ L'ADN peut être extrait d'un animal mort congelé dans la banquise arctique.

- (8) Qu'est-ce qu'un gène et quel est son rôle dans l'hérédité ? Coche les réponses qui te semblent correctes. (QCM génétique)
 - ☐ Chaque gène correspond à une caractéristique physique (ex : il existe un gène qui détermine notre taille, un autre qui détermine notre couleur de cheveux,...) et nous les héritons de nos parents.
 - ☐ Tous les gènes sont hérités des deux parents de manière égale.
 - ☐ Les gènes sont des structures de l'ADN que nous héritons de nos parents.
 - ☐ Les gènes sont identiques chez tous les individus de la même espèce.
 - ☐ Nous ne possédons aucun gène commun avec les autres individus de notre espèce, c'est ce qui explique nos différences (à l'exception des jumeaux).
 - ☐ Le gène est un morceau d'ADN qui correspond à une information génétique et grâce auquel se transmet une caractéristique physique héréditaire.
 - ☐ Les gènes sont différents d'une cellule à l'autre de notre corps puisqu'elles n'ont pas la même fonction (une cellule de l'œil par rapport à une cellule de l'intestin).

- (9) As-tu déjà réalisé une expérience d'extraction de l'ADN ? OUI – NON (entoure la bonne réponse) (Extraction)

- (10) As-tu déjà participé à des activités scientifiques extrascolaires (Printemps des Sciences, animation Cap Sciences,...) ? (10b) Si oui laquelle, lesquelles ? (Activités scientifiques extrascolaires)

2.4. Analyse des données

Les données ont été traitées à l'aide des logiciels Excel et Prism, à partir desquels les différentes analyses statistiques ont été effectuées pour examiner les tendances et les variations dans les réponses des élèves. En particulier, un test de Mann-Whitney a été réalisé pour la question 6 et un test du χ^2 pour la question 3. Pour les autres questions, des tests de proportion avec une correction de Bonferroni ont été utilisés pour évaluer les différences de réponse entre les différents niveaux d'enseignement (Armstrong, 2014). La différence entre les deux groupes a été testée avec une p-valeur de 0,05. En raison des multiples tests effectués pour chaque

question globale, il a été nécessaire de multiplier chaque p-valeur par le nombre de tests réalisés afin d'ajuster le seuil de significativité. Dans ce mémoire, les astérisques représentent une différence significative après avoir effectué un test de proportion et appliqué une correction de Bonferroni. Ces analyses ont permis d'évaluer la pertinence et la signification des variations observées dans les réponses des élèves des différents degrés.

2.5. Interviews des enseignants

Enfin, deux enseignants par degré ont été interrogés. Une séance d'entretien individuelle a été organisée avec chacun d'eux. Ces entretiens ont été structurés autour de trois principaux axes :

- conscience des préconceptions : les enseignants ont été invités à partager leurs observations et impressions sur les préconceptions que les élèves pourraient avoir en abordant des concepts liés à l'ADN,
- impact sur l'apprentissage : les enseignants ont été interrogés sur leur perception de la façon dont ces préconceptions pourraient influencer la construction de nouvelles connaissances scientifiques chez les élèves,
- stratégies d'enseignement : les enseignants ont été invités à décrire les stratégies spécifiques qu'ils emploient pour aider les élèves à surmonter ces préconceptions et à construire une compréhension plus précise.

Primaire et D1

1. Quels sont, pour vous, les critères essentiels qui permettent de décrire un être vivant ? Si vous deviez définir le vivant avec vos élèves, quels critères utiliseriez-vous parmi ceux que vous avez mentionnés ?
2. Si vous en parlez, comment faites-vous la distinction entre la respiration cellulaire et la ventilation ?
3. Comment abordez-vous la question de la définition du vivant dans vos cours de sciences ?
4. Avez-vous l'habitude de relever les préconceptions de vos élèves avant de commencer un nouveau chapitre ? Si oui, comment procédez-vous ?
5. Avez-vous déjà recueilli les préconceptions de vos élèves au sujet du vivant ? Si oui, quelles sont les principales préconceptions de vos élèves ?
6. Pensez-vous que ces préconceptions ont une influence sur la manière dont les élèves vont apprendre la matière et la retenir ?

7. Quelles stratégies ou approches didactiques utilisez-vous pour aborder ces préconceptions et favoriser la construction de nouvelles connaissances ?
8. Même si ce n'est pas au programme, avez-vous déjà reçu un questionnement venant des élèves concernant l'ADN ou la génétique ? Si oui, de quel type ?
9. Quels types d'activités ou de discussions utilisez-vous pour aider les élèves à faire la distinction vivant/non-vivant ?
10. Montrer les chiffres obtenus (voir résultats) et demander s'il/elle s'attendait à cela et s'il/elle observe également cela.

D3

1. Quels sont, pour vous, les critères essentiels qui permettent de décrire un être vivant ? Si vous deviez définir le vivant avec vos élèves, quels critères utiliseriez-vous parmi ceux que vous avez mentionnés ?
2. Lorsque le thème s'y prête, prenez-vous parfois le temps de préciser la distinction vivant/non-vivant avec vos élèves ? Si oui, comment procédez-vous ?
3. Avez-vous l'habitude de relever les préconceptions de vos élèves avant de commencer un nouveau chapitre ? Si oui, comment procédez-vous ?
4. Avez-vous déjà recueilli les préconceptions de vos élèves au sujet de l'ADN et de la génétique ? Si oui, quelles sont les principales préconceptions de vos élèves ?
5. Pensez-vous que ces préconceptions ont une influence sur la manière dont les élèves vont apprendre la matière et la retenir ?
6. Même si ce n'est pas au programme, avez-vous déjà observé des difficultés spécifiques ou des remarques particulières venant des élèves concernant la notion vivant/non-vivant ?
7. Abordez-vous l'utilisation de l'ADN dans des domaines tels que la criminalistique ou les tests de filiation ?
8. Comment surmontez-vous ces préconceptions ?
9. Si vous en parlez, comment faites-vous la distinction entre la respiration cellulaire et la ventilation ?
10. Montrer les chiffres obtenus (voir résultats) et demander s'il/elle s'attendait à cela et s'il/elle observe également cela.

3. Résultats

3.1. Test préliminaire

Le test préliminaire a permis de révéler qu'interroger des élèves de troisième et quatrième primaire était peu pertinent. En effet, aux questions « Qu'est-ce qu'un être vivant ? » et « Qu'est-ce que l'ADN ? », 32% et 45% des élèves respectivement étaient sans avis sur les questions ou proposaient des réponses incohérentes ?. Cependant, ce test a pu mettre en évidence que 25% des élèves de troisième et 50% des élèves de quatrième ont déjà entendu parler du mot « ADN ». Les élèves plus âgés se sont montrés plus loquaces, avec 16% et 32% d'abstention respectivement pour les questions sur le vivant et sur l'ADN. Cependant, même dans les dernières années du primaire certaines réponses peu perspicaces subsistent. Par exemple, à la question « Qu'est-ce qu'un être vivant ? », un élève a répondu « Un être qui vit ». Ce type de réponse ne permet pas de mettre en avant les conceptions des élèves. C'est pour cette raison qu'il est préférable d'opter exclusivement pour un questionnaire à choix multiple pour les élèves de primaire.

3.2. Évolution des conceptions de la fin des primaires à la fin des secondaires

Connaissance du concept de l'ADN et de sa localisation en primaire (QCM)

Quatre-vingt pour cent des élèves de 5^{ème} et 6^{ème} primaire sondés ont déjà entendu parler du concept d'ADN. Les sources d'ADN prioritairement identifiées par les élèves sont le sang (59%), la salive (53%) et les empreintes digitales (49% ; Fig.1). Le concept de cellule est également mentionné par 48% des élèves.

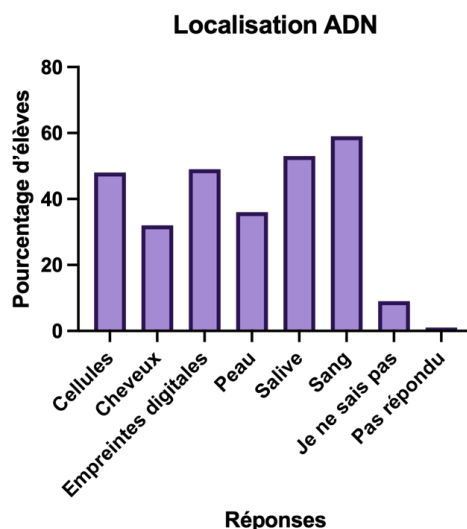


Figure 1. Fréquences de réponses des élèves de 5^{ème} et 6^{ème} primaire à la question « Est-ce que tu sais où on peut trouver de l'ADN ? »

Localisation de l'ADN en secondaire (QO)

Le profil des réponses obtenues pour le D1 et le D3 est significativement différent dans certains cas (Fig.2). Si les élèves du D3 identifient le noyau (30%) et la cellule (60% - cumul de noyau et cellule) comme étant des réservoirs d'ADN, les élèves du D1 orientent leurs réponses prioritairement autour du sang, du corps et des empreintes digitales (Fig.2). De plus, 5,6% précisent parfois en exprimant la présence d'ADN dans le noyau et dans le cytosol des procaryotes. Neuf pour cent des élèves du D1 n'ont pas de réponse à cette question, là où tous les élèves du D3 ont répondu.

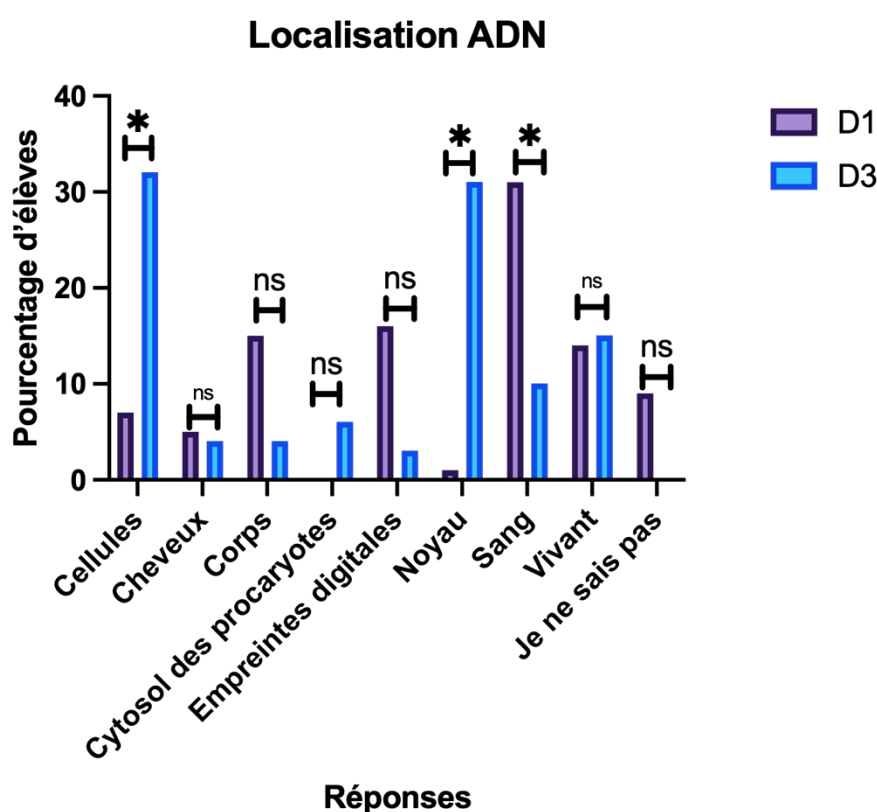


Figure 2. Fréquences de réponses des élèves du D1 et du D3 à la question « Où peut-on trouver de l'ADN ? »

Utilisation ADN (QO)

Les résultats concernant l'utilisation de l'ADN révèlent que les élèves du troisième degré répondent davantage à cette question que les élèves du D1 et aucun ne s'est abstenu. Au premier degré, 31 % des élèves et au troisième degré, 67 % des élèves reconnaissent que l'ADN est unique à chaque individu. La deuxième réponse la plus donnée (24% pour le D1 et 40% pour le D3) est « Filiation », c'est-à-dire que les élèves évoquaient dans leur réponse les

similarités d'ADN au sein d'une famille. Certaines conceptions erronées ont été identifiées dans les réponses des élèves. Un petit pourcentage, soit 1 % des élèves du premier degré et 6 % du troisième degré, croit que toutes les séquences d'ADN individuelles sont enregistrées dans une base de données. En outre, 7 % des élèves du premier degré et 3 % du troisième degré confondent l'ADN avec les empreintes digitales. En ce qui concerne l'apparence physique, 13,5 % des élèves du premier degré et 9,8 % du troisième degré pensent qu'il est possible de déterminer l'apparence d'un suspect à partir de sa séquence d'ADN (Fig. 3).

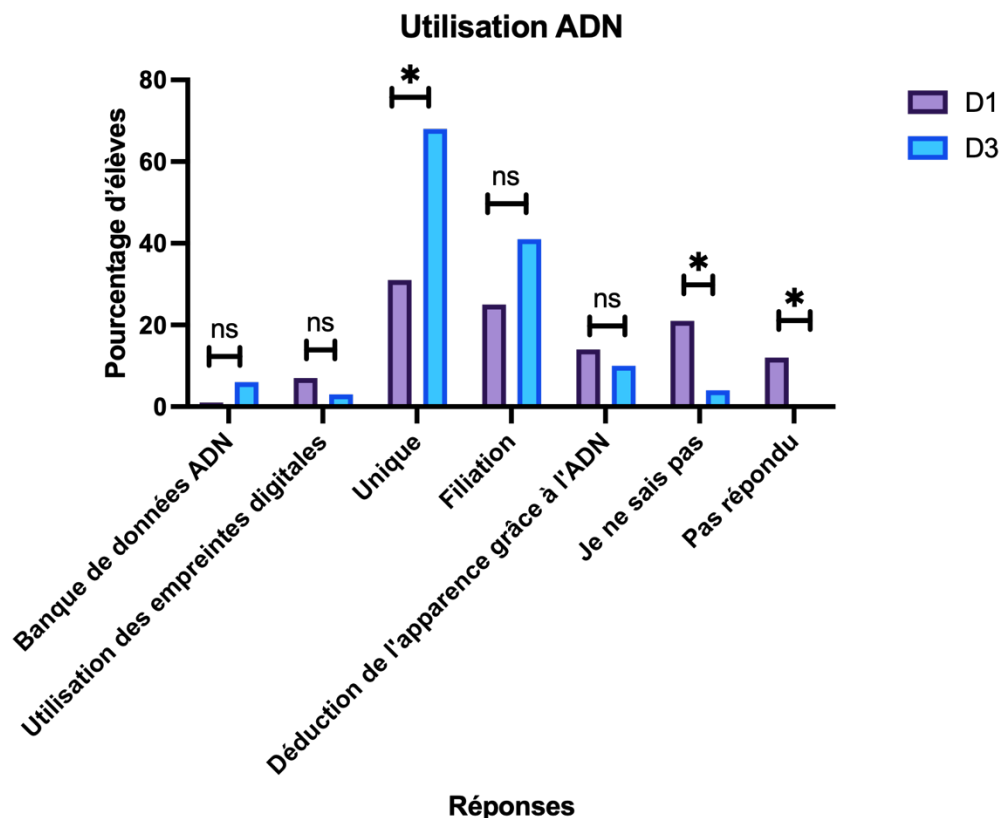


Figure 3. Fréquences de réponses des élèves du D1 et du D3 à la question « Pourquoi l'ADN peut-il être utilisé pour résoudre des problèmes d'identification, tels que les tests de paternité ou les enquêtes criminelles ? »

Composition ADN (QO)

La question sur la composition de l'ADN n'était posée qu'aux élèves de cinquième et sixième secondaire. Dans la plupart des cas (49%), les élèves ont mentionné les bases azotées mais ont négligé les groupements phosphates (cités par 9% des sondés) et les sucres/désoxyriboses (cités par 9% des élèves). Un groupe d'élèves, représentant 19 %, indique que l'ADN est composé d'acides aminés, de ribosomes, d'enzymes ou de protéines. Par ailleurs, 33 % des élèves ne parviennent pas à identifier la composition de l'ADN (Annexe 4).

ADN vivant (QO)

À la question « L'ADN est-il un composé vivant ? » (Fig. 4), il y a autant d'élèves au début du secondaire et à la fin (32% et 30%) qui répondent affirmativement. Cependant, une proportion significativement supérieure d'élèves du D3 (56%) ont affirmé que l'ADN n'est pas un composé vivant contre 37% des élèves D1 (χ^2 ; p value = 0,0331).

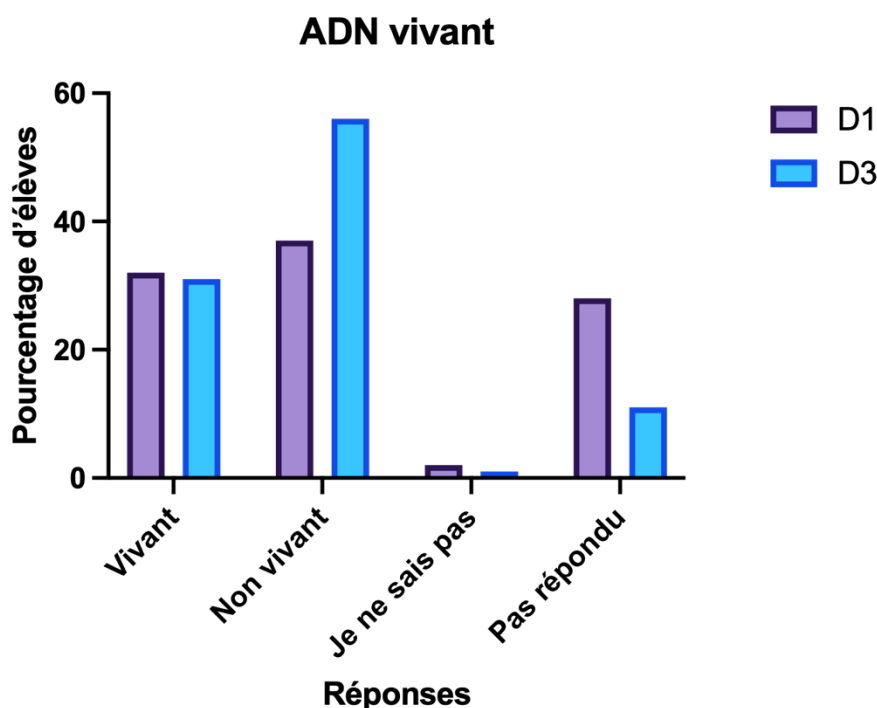


Figure 4. Fréquences de réponses des élèves du D1 et du D3 à la question « L'ADN est-il un composé vivant ? »

Un test du χ^2 a été réalisé pour voir si les réponses obtenues par les élèves ayant participé à des activités scientifiques extrascolaires différaient des réponses des élèves n'y ayant pas participé. Ce test a révélé qu'il n'existait pas de différence significative entre les deux groupes. Le contenu des activités auxquelles les élèves ont participé n'est pas connu (Annexe 3).

Définition vivant en secondaire (QO)

Lorsque l'on demande aux élèves de définir spontanément le vivant (Fig. 5), respiration (56%), nutrition (55%) et reproduction (50%) représentent les 3 actions les plus souvent citées comme définissant la vie. En outre, il ressort qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux degrés pour cette question. D'autres caractéristiques ont été suggérées par une minorité

d'élèves (Annexe 2), comme le fait d'être un humain, cité par 5 élèves sur 152 pour définir le vivant.

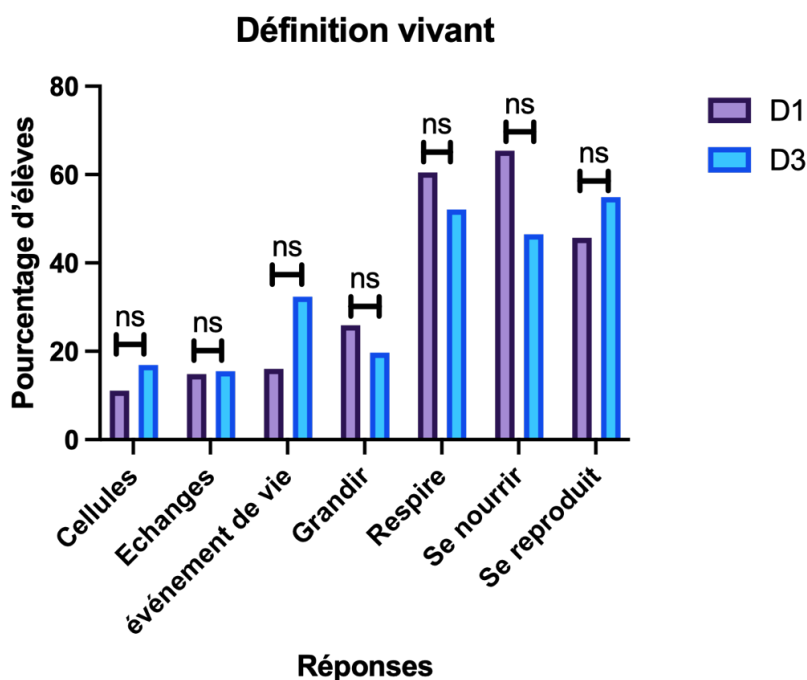


Figure 5. Fréquences de réponses des élèves du D1 et du D3 à la question ouverte « Définis avec tes mots la notion d'être vivant. »

Caractéristiques vivant (QCM)

Cette question est, pour rappel, une question QCM qui porte sur les caractéristiques des êtres vivants (Fig. 6). De manière générale, les élèves cochaient beaucoup de caractéristiques pour définir un être vivant (7,8 concepts cochés par élève sur un total de 12). Cette question a permis de mettre en avant que plus les élèves avancent dans leur parcours scolaire moins ils ont tendance à décrire le vivant comme un être sensible (pense, ressent des émotions) ou motile (bouge, possède un système nerveux). Les élèves du troisième degré ont moins coché la case « Évolue » pour qualifier un être vivant par rapport aux élèves du primaire.

La proposition qui a le plus souvent été sélectionnée est « Respire ». Cette notion de respiration s'apparente au mécanisme de la ventilation pour la plupart des élèves (64% des élèves du D1 et 74% des élèves du D3) (Annexe 5). Seuls 2 élèves ont parlé de la respiration cellulaire.

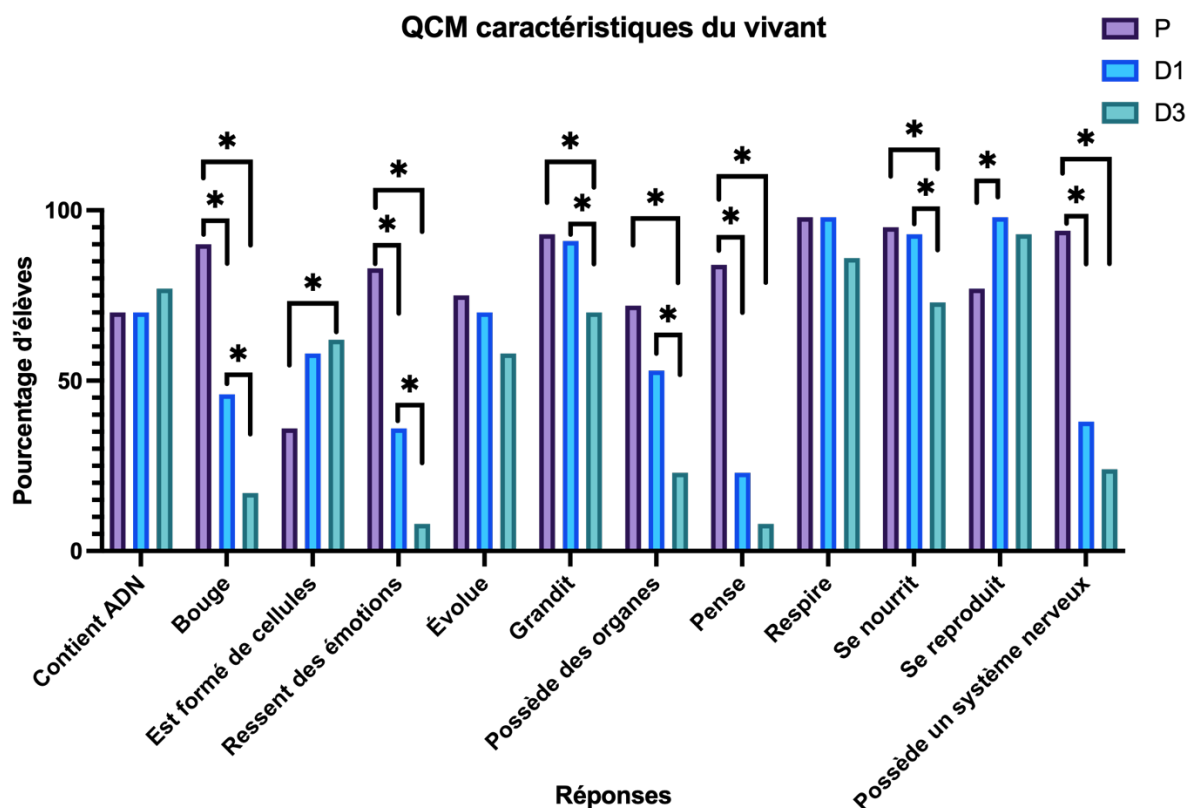


Figure 6. Fréquences de réponses des élèves de primaire et de secondaire au QCM sur les caractéristiques du vivant.

En attribuant un score à chaque élève en fonction des cases qu'il a cochées, il est possible de constater que les moyennes des élèves de primaire ($6,210 \pm 1,17$) sont significativement inférieures à celles du D1 ($8,815 \pm 1,6$; $p\text{-value} < 0,0001$), elles-mêmes significativement inférieures à celles du D3 ($9,394 \pm 1,45$; $p\text{-value} = 0,0278$; Mann-Whitney).

Caractéristiques essentielles vivant (QCM)

Après avoir coché quelques propositions, les élèves (D1 et D3) devaient en souligner certaines qui, à elles seules, permettent de caractériser le vivant. Cette sous-question met en évidence les caractéristiques que les élèves jugent suffisantes et importantes pour définir ce qui est vivant. Ils ont d'ailleurs coché beaucoup moins de propositions que lors de la question précédente (2,3 concepts soulignés par élève sur un total de 12) tout en notant que beaucoup d'élèves n'ont pas répondu (39%). Les élèves du troisième degré sélectionnent plus souvent « Contient de l'ADN » que ceux du premier degré, avec 28 % contre 9 %. À l'inverse, la croissance est moins choisie comme caractéristique essentielle au troisième degré, à 13 %, comparé à 33 % au premier degré. Les autres caractéristiques ont été cochées dans des proportions assez similaires pour les deux degrés (Fig. 7).

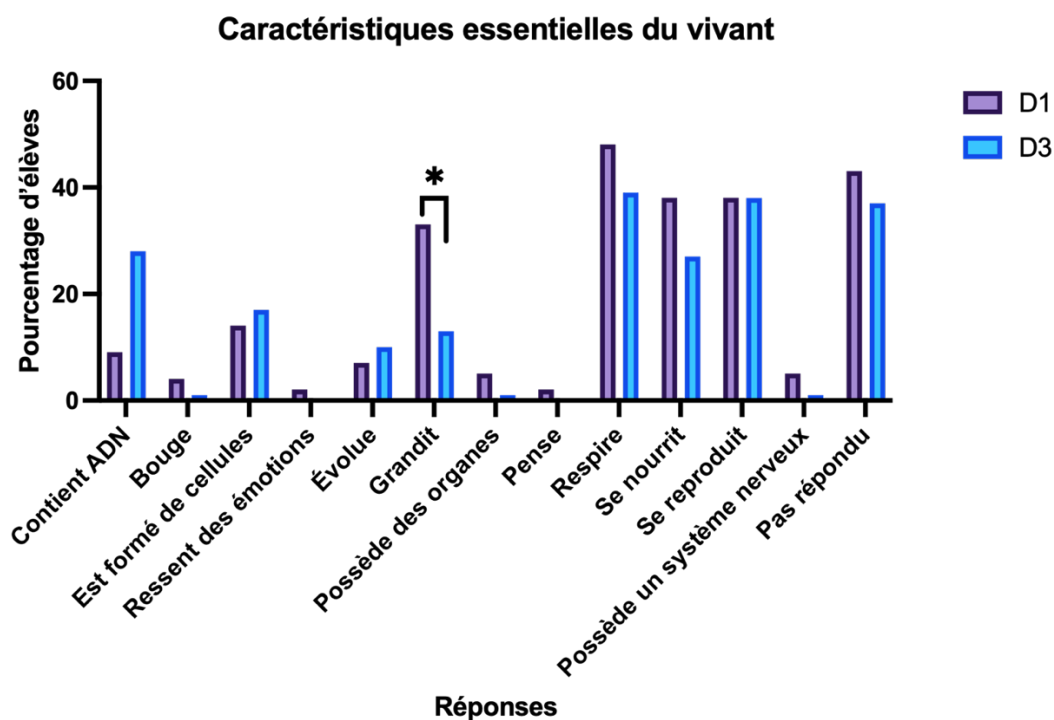


Figure 7. Fréquences de réponses des élèves de primaire et de secondaire au QCM sur les caractéristiques essentielles du vivant.

QCM ADN

La question numéro 7 était une question à choix multiple et s'intéressait à différentes préconceptions au sujet de l'ADN. Plusieurs constats peuvent être faits :

- près de 35% des élèves du premier degré pensent que certains êtres vivants peuvent se passer d'ADN,
- tous niveaux confondus, environ 30% des élèves affirment qu'ADN et empreintes digitales sont synonymes avec même 18% pour les élèves du D3,
- tous niveaux confondus de nouveau, 43% des élèves pensent qu'il n'y a pas d'ADN chez les êtres vivants non animés tels que les fruits.

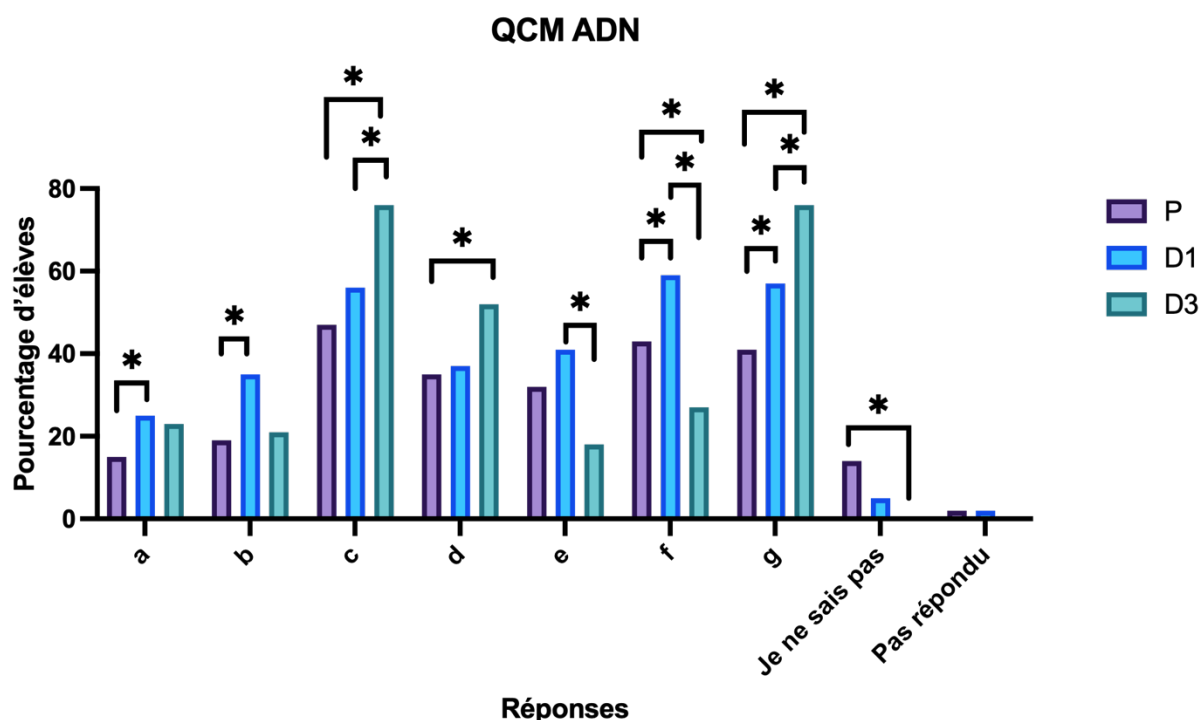


Figure 8. Fréquences des réponses au QCM sur l'ADN

- a) Il est vivant car il fait lui-même partie du vivant.
- b) Certains êtres vivants n'ont pas besoin d'ADN.
- c) Il est présent dans toutes les cellules.
- d) Il est impossible de vivre sans ADN.
- e) ADN et empreintes digitales sont synonymes.
- f) On ne trouve de l'ADN que chez les êtres vivants animés (ex : il n'y a pas d'ADN dans une noisette).
- g) L'ADN peut être extrait d'un animal mort congelé dans la banquise arctique.

QCM génétique

Ce QCM a permis de mettre en avant trois conceptions (Fig. 9) :

- un peu moins de 70% des élèves du D1 et plus de 80% des élèves du D3 pensent qu'un gène correspond à une caractéristique physique,
- en moyenne, 67,5% des élèves cochent la définition correcte du concept de gène (n),
- 48% des élèves pensent que des types cellulaires distincts possèdent des gènes différents.

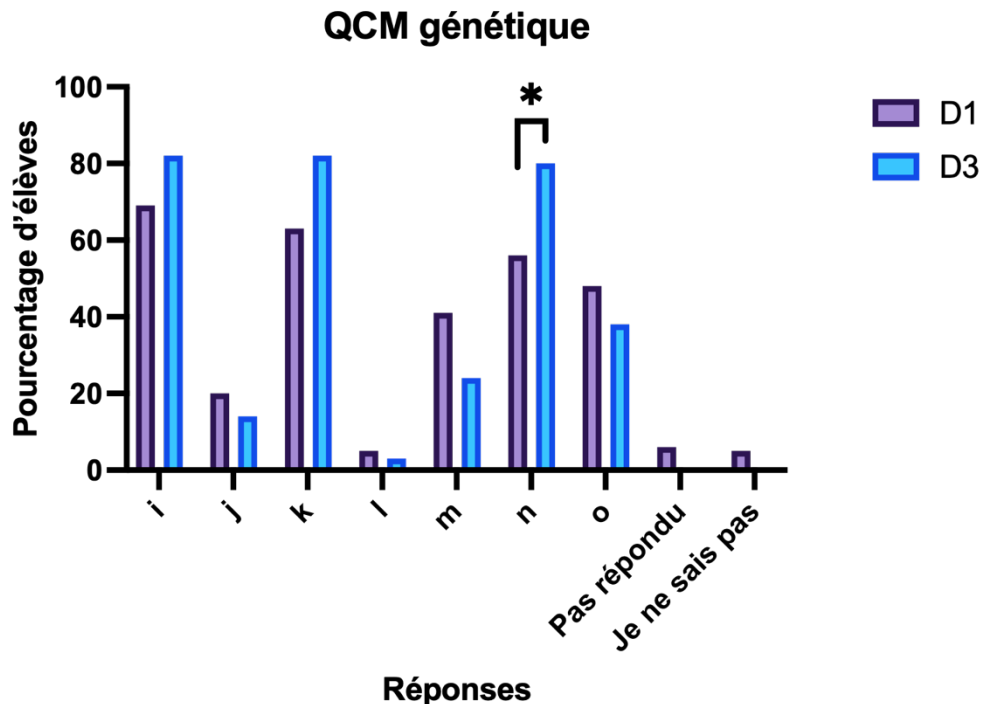


Figure 9. Fréquences des réponses au QCM portant sur la génétique.

- i) Chaque gène correspond à une caractéristique physique (ex : il existe un gène qui détermine notre taille, un autre qui détermine notre couleur de cheveux,...) et nous les héritons de nos parents.
- j) Tous les gènes sont hérités des deux parents de manière égale.
- k) Les gènes sont des structures de l'ADN que nous héritons de nos parents.
- l) Les gènes sont identiques chez tous les individus de la même espèce.
- m) Nous ne possédons aucun gène commun avec les autres individus de notre espèce, c'est ce qui explique nos différences (à l'exception des jumeaux).
- n) Le gène est un morceau d'ADN qui correspond à une information génétique et grâce auquel se transmet une caractéristique physique héréditaire.
- o) Les gènes sont différents d'une cellule à l'autre de notre corps puisqu'elles n'ont pas la même fonction (une cellule de l'œil par rapport à une cellule de l'intestin).

3.3. Interviews des enseignants

Primaire

Les trois critères de vie mis en avant en premier par les deux instituteurs sont la respiration, la reproduction et le cycle de vie. Ce sont, pour eux, les critères qui définissent le vivant et par conséquent, ce sont ces critères qu'ils essayent de transmettre à leurs élèves. Lorsqu'il leur a été demandé de préciser ce qu'ils entendaient par respiration, ils ont tous deux spontanément fait référence à la ventilation. Après réflexion, l'un a évoqué la production d'énergie et l'autre la photosynthèse. Ce dernier a précisé qu'il réalisait en classe une expérience centrée sur la respiration humaine afin de développer la démarche scientifique des élèves.

Pour commencer le chapitre sur le vivant, les deux personnes interrogées procèdent de manière similaire. Tout d'abord, de manière générale, avant de commencer un chapitre, il relèvent les préconceptions.

- Enseignant 1 : « Je procède par brainstorming, débat ou demande aux élèves de travailler deux par deux pour qu'ils comparent leur vision. »
- Enseignant 2 : « Je fais cela uniquement à l'oral et prends soin de ne pas noter au tableau ce qui est faux. Il est très important de ne pas passer trop de temps sur les préconceptions afin que les élèves ne retiennent pas quelque chose de faux. »

Ensuite, pour aborder la distinction vivant/non-vivant, ils utilisent la classification. Différents exemples d'êtres vivants ou non sont présentés en photo et les élèves doivent les classer. L'enseignant 1 précise que « ce ne sont pas des cas complexes qui sont présentés : on montre des photos d'animaux, de végétaux ou bien d'objets ».

Les deux enseignants ont déjà relevé des conceptions particulières chez leur élèves.

- Enseignant 1 : « J'ai déjà eu plusieurs élèves qui pensaient que la mer était vivante car elle bouge. Certains ont également du mal avec les ordinateurs, ils pensent qu'ils sont vivants car ils sont animés. »
- Enseignant 2 : « Concernant la respiration, j'ai eu des élèves qui pensaient qu'il n'était possible de respirer que par le nez ou bien que par la bouche. »

Les deux enseignants affirment que ces préconceptions ont une influence sur la manière dont les élèves vont appréhender la matière et ils utilisent également la même stratégie pour lutter contre les conceptions erronées. Ils y reviennent systématiquement à la fin du cours et confrontent les élèves à leurs erreurs. L'enseignant 2 ajoute que cela est une source de motivation pour les élèves car « ils voient que leur vision évolue ». Pour l'enseignant 1, il n'est pas rare que les élèves gardent leurs conceptions initiales.

Pour ce qui est de l'origine des préconceptions, les deux enseignants évoquent internet, entre autres.

- Enseignant 1 : « Les jeunes croient beaucoup ce qu'ils voient sur Tiktok. Ils ont du mal à différencier ce qui est fictif de la réalité. »
- Enseignant 2 : « Ils sont très accrochés à leur téléphone et aux séries. Ils sont également très influencés par ce que disent les parents, il y a beaucoup de différences sociales. »

Les deux enseignants ne mentionnent pas l'ADN en classe car ils estiment que c'est trop complexe pour leurs élèves.

Premier degré

Les critères utilisés par les différents enseignants ne sont pas tout à fait les mêmes.

- Enseignant 3 : « Les êtres vivants se définissent comme étant capables de grandir, mourir, se nourrir, se reproduire et s'adapter à leur environnement. J'utilise donc l'ensemble de ces critères pour définir la nature, vivante ou morte, d'un organisme. »
- Enseignant 4 : « J'utilise les critères d'excitabilité, de reproduction et être structuré avec différentes fonctions comme la respiration. Par excitabilité, j'entends la capacité de réagir à des stimuli. »

Les deux enseignants ont précisé qu'ils ne faisaient pas la distinction entre la respiration cellulaire et la ventilation car ce n'est pas au programme.

Les deux enseignants relèvent également les préconceptions en début de chapitre.

- Enseignant 3 : « Je les relève le plus souvent possible grâce à des situations problèmes, des Kahoot ou du brainstorming. »
- Enseignant 4 : « Les élèves prennent une feuille et note le concept au centre. Ils peuvent ensuite effectuer une sorte de mind map, où il est possible de faire des schémas ou d'utiliser des mots-clés. C'est également grâce aux évaluations que l'on peut se rendre compte des conceptions erronées. »

Ces enseignants utilisent la classification de photos pour distinguer le vivant/non-vivant, tout comme les enseignants de primaire. L'enseignant n°3 ne se souvient pas avoir déjà relevé des préconceptions particulières chez ses élèves. L'enseignant 4 relève que « beaucoup d'enfants ont du mal à admettre qu'une maison n'est pas vivante ou encore le soleil ».

Les deux enseignants affirment que ces préconceptions ont une influence sur l'apprentissage. Ils préconisent donc d'y revenir à la fin d'un chapitre pour s'assurer qu'elles ne sont plus présentes. L'enseignant 4 a recours aux remédiations tandis que l'enseignant n°3 ajoute : « Si elles sont trop éloignées de la réalité, il est important de prendre le temps de les déconstruire afin que les notions correctes soient bien assimilées. La plupart du temps, j'aime procéder grâce à des expériences (si c'est possible) : le résultat de l'expérience devra prouver à l'élève que ce qu'il pensait était correct ou erroné. S'il n'y a pas d'expérience possible, j'utilise

plutôt un tableau de résultat. Par exemple, un tableau montrant les taux des différents gaz présents dans l'air inspiré et dans l'air expiré. En fonction des sujets abordés, il faut s'adapter car cela n'est pas toujours possible.»

Seul l'enseignant 4 a parlé des origines potentielles des préconceptions, il évoque l'influence culturelle et cite en exemple la culture africaine. Il ajoute également que les séries télévisées ont une influence importante car les élèves manquent de recul.

Les deux enseignants ne mentionnent pas l'ADN en classe.

Troisième degré

De nouveau, les critères utilisés pour définir le vivant ne sont pas identiques chez les deux enseignants.

- Enseignant 5 : « Les critères importants sont la respiration, donc créer de l'énergie, être capable de se nourrir, réagir à des stimuli et se reproduire. »
- Enseignant 6 : « Tout d'abord, il faut être composé de cellules, se reproduire, bouger, réagir à des stimuli et posséder un métabolisme. »

Pour l'enseignant 6, des précisions ont été demandées quant à la capacité de bouger des êtres vivants. Il a alors complété avec la motilité interne des végétaux. Ce sont ces mêmes critères que les enseignants utilisent avec leurs élèves.

Les deux enseignants n'abordent pas spécialement la distinction vivant/non-vivant avec leurs élèves si ce n'est lorsqu'ils parlent des virus. Le critère qu'ils utilisent est alors la reproduction puisque ceux-ci ne peuvent se reproduire seuls.

Les deux enseignants déclarent ne pas toujours relever les préconceptions en début de chapitre.

- Enseignant 5 : « Je ne relève pas spécialement les préconceptions, car c'est généralement très pauvre et les élèves ne sont pas très sérieux. »
- Enseignant 6 : « Je ne le fais pas de manière systématique. De temps en temps, je demande oralement s'ils ont déjà entendu parler d'un concept. Très souvent j'ai des remarques peu pertinentes ou pas de réaction. »

L'enseignant 5 n'a pas relevé de conceptions particulières concernant le vivant, l'ADN ou même la génétique, si ce n'est qu'il constate de grosses difficultés chez les élèves concernant

le chapitre sur les protéines. En revanche, l'enseignant 6 souligne que le sujet de la génétique est propice au développement de conceptions erronées, il en a relevé plusieurs : « En génétique, les garçons principalement nient l'influence de l'environnement sur les caractères observés. Par exemple, si quelqu'un est musclé, c'est parce qu'il possède une bonne génétique et pas parce qu'il s'entraîne. Cela peut même provoquer des moqueries. De plus, les élèves ont tendance à percevoir les mutants comme des monstres, ils n'envisagent pas les petites mutations. Au sujet du vivant, les élèves ont des difficultés avec les fruits mais aussi les bactéries que l'on retrouve dans le lait ou le fromage, par exemple. »

Les préconceptions sont considérées par les deux enseignants comme des freins majeurs à l'apprentissage. Ils déclarent tous deux qu'elles restent souvent très présentes à la fin du cours et sont source de beaucoup d'erreurs. Pour remédier aux conceptions persistantes, les deux enseignants disent expliquer pourquoi elles sont fausses. Cependant, il n'est pas toujours possible de les chasser complètement.

Au cours de l'interview, les enseignants ont évoqué ne pas avoir ressenti que les élèves possédaient une vision biaisée de la génétique causée par internet ou les médias de manière générale.

Les enseignants ont également déclaré ne pas parler d'ADN dans le cadre de tests de filiation ou de criminalistique dans leur cours.

4. Discussion

Test préliminaire

Le test préliminaire visait à évaluer la compréhension de concepts biologiques fondamentaux chez les élèves de l'enseignement primaire. Les résultats obtenus démontrent une différence notable entre les niveaux de compréhension des élèves de troisième et quatrième année comparativement à ceux de cinquième et sixième année. Cette différence d'acquisition des connaissances peut être attribuée à la maturité cognitive. Comme le soulignent Bouchard *et al.* (2011), entre 9 et 12 ans, les capacités cognitives du jeune poursuivent leur évolution et se complexifient tout comme le langage et l'écriture. Il est vrai que les élèves de cinquième et sixième année ont fourni des réponses plus élaborées. Toutefois, la récurrence de réponses superficielles telles qu'« un être vivant est un être qui vit » suggère que, même à ces niveaux,

la compréhension du concept du vivant n'est pas tout à fait atteinte. Toutefois, une autre possibilité est que la question n'était pas assez précise, peut-être aurait-il fallu demander aux élèves de citer les caractéristiques d'un être vivant. Néanmoins, cela révèle que les questions ouvertes ne sont pas le meilleur moyen d'interroger les élèves de primaire. Un test QCM permet de contourner les limites de l'expression libre et obtenir des données plus précises sur la compréhension des élèves. Cette méthode permet d'éviter les réponses vagues et d'orienter les élèves vers des réflexions plus structurées sur les concepts étudiés (Treagust, 1986). Pour les degrés supérieurs, combiner QCM et questions ouvertes a permis de tirer avantage des deux techniques puisque les questions ouvertes ont permis de comprendre plus précisément le raisonnement de l'élève.

Identification et évolution des conceptions

Grâce à cette combinaison de techniques, il a été possible de constater l'évolution de certaines conceptions. Notamment, les résultats obtenus auprès des élèves du secondaire avec la question ouverte sur la localisation de l'ADN montrent une évolution notable dans la compréhension de la localisation de l'ADN, avec des conceptions plus précises observées chez les élèves du troisième degré par rapport à ceux du D1. Cependant, le fait que plus de 30% des élèves du D3 limitent la localisation de l'ADN au noyau suggère que des idées fausses subsistent et que des clarifications supplémentaires sont nécessaires pour aborder l'existence des procaryotes et la présence de l'ADN dans les mitochondries et les chloroplastes. En effet, seulement 5,6% des élèves ont mentionné la présence de l'ADN dans le cytoplasme des procaryotes et aucun élève n'a mentionné les mitochondries et les chloroplastes. Ceci est sans doute dû au fait que la présence d'ADN dans ces organites est peu traitée dans le programme du réseau officiel et n'est pas du tout couverte dans le programme du réseau libre (WBE 2014 ; FESeC 2014) . De plus, peu de temps est accordé à l'apprentissage des cellules procaryotes dans les programmes qui se focalisent davantage sur les cellules eucaryotes. Par ailleurs, les procaryotes et la microbiologie sont des sujets où l'on retrouve de nombreuses conceptions erronées (Briggs et al., 2017; de Fraga, 2018). Par exemple, les procaryotes sont souvent associés à des micro-organismes pathogènes par les élèves, ce qui peut encore entraîner d'autres nombreuses conceptions erronées (Simard, 2021). La diminution de l'association de l'ADN avec les empreintes digitales, chez les jeunes du D3 par rapport au D1 démontre que les élèves font la différence entre la localisation cellulaire de l'ADN et ses sources éventuelles. En outre, les élèves du D3 associent moins le sang comme lieu où l'on trouve de l'ADN. Il est important de

noter que, bien que le sang soit un vecteur d'ADN, il n'est pas le seul ni le principal "réservoir" d'ADN dans le corps. Dernièrement, le fait que tous les élèves du D3 aient répondu à la question de la localisation de l'ADN, contrairement à 9% des élèves du D1, témoigne d'une confiance accrue dans la justesse de leur réponse et d'une familiarité avec le concept. D'autres améliorations de la compréhension du concept d'ADN ont également été relevées avec la question sur l'utilisation de l'ADN. L'augmentation de la reconnaissance de l'unicité de l'ADN chez chaque individu, de 31% à 67%, ainsi que la compréhension de la filiation génétique, de 24% à 40%, témoignent d'une meilleure appréhension des concepts fondamentaux de la génétique au fur et à mesure que les élèves avancent dans leur scolarité. Ceci est en accord avec la littérature : les élèves ont tendance à démontrer un raisonnement sur la nature de l'ADN, notamment son principe d'unicité (Saavedra et al., 2013; Wisch et al., 2018).

À propos de la composition de l'ADN, les résultats indiquent que les élèves de cinquième et sixième secondaire (D3) ont une connaissance partielle des composants de l'ADN, avec une mention prédominante des bases azotées (49%) mais une attention insuffisante aux groupements phosphates (9%) et aux sucres/désoxyriboses (9%). Cela est tout de même étonnant car ils ont normalement reçu l'enseignement sur la structure de l'ADN une ou deux années auparavant. De plus, la confusion entre l'ADN et les protéines, indiquée par 19% des élèves, est en adéquation avec ce que l'on retrouve dans la littérature (Duncan et al., 2011; Duncan and Reiser, 2007; Duncan and Tseng, 2011; Tsui and Treagust, 2010) ; les étudiants confondent ADN et protéines, ils ne parviennent pas à faire la différence entre l'ADN et sa séquence de bases, et les protéines avec leur séquence d'acides aminés. Cette difficulté a d'ailleurs également été relevée par un des enseignants interrogés. Cela souligne un besoin d'enseignement plus clair sur la structure et la fonction des macromolécules biologiques, comme le recommandent Lewis et Kattmann (2004).

L'interprétation erronée de la relation entre gènes et caractéristiques physiques est également préoccupante, avec moins de 70% des élèves du D1 et plus de 80% du D3 qui simplifient à tort cette relation. Cette conception réductrice ne tient pas compte de la complexité des interactions polygéniques et de l'influence de l'environnement, qui sont essentielles à la compréhension du phénotype. Ces chiffres sont en accord avec les constations de Lewis et Kattman (2004). Ces derniers ont décrit la tendance naturelle des étudiants à se concentrer sur le phénotype (qui peut être facilement visualisé) plutôt que sur le génotype (qui est plus abstrait). Cela peut conduire à l'idée naïve que le phénotype et le génotype se reflètent l'un

l'autre, cette relation inexacte est d'ailleurs illustrée par le fait que 11,6% des élèves pensent que l'on peut dresser le portrait d'une personne à partir de sa séquence d'ADN. Une autre conception préoccupante est que 48% des élèves pensent que toutes les cellules d'un même type contiennent la même information génétique et que les cellules de types différents contiennent une information génétique différente, cela se retrouve également dans la littérature (Lewis et al., 2000; Wood-Robinson et al., 2000)

Pratiques des enseignants

Trois enseignants sur six interrogés, tout comme plusieurs chercheurs, soutiennent que, la plupart du temps, les élèves gardent leurs conceptions initiales même après avoir reçu un cours sur le sujet (Smith et al., 1993; von Kotzebue et al., 2022). Les causes de la conservation des conceptions sont diverses et complexes. Tout d'abord, malgré la reconnaissance unanime de l'importance des préconceptions dans l'apprentissage des élèves, il est surprenant de constater que deux enseignants ne prennent pas systématiquement la peine de les identifier avant de commencer un chapitre. Pourtant, il a bel et bien été montré que les préconceptions des élèves peuvent affecter positivement ou non l'apprentissage de nouveaux concepts scientifiques (Vosniadou, 1994), et qu'il est primordial de les adresser explicitement pour favoriser une compréhension approfondie (*How People Learn*, 2000). Si les enseignants n'ont pas connaissance des préconceptions, ils ne peuvent que difficilement les corriger. C'est pourquoi quatre d'entre eux disent relever les préconceptions systématiquement. Ensuite, en ce qui concerne la technique qu'ils utilisent, les enseignants ont mentionné l'évaluation diagnostique, le débat et le brainstorming. Ghariz *et al.* (2023) indiquent que le débat en classe constitue une étape clé puisqu'il vise à déconstruire tous les clichés mentaux des apprenants afin de faire place aux nouvelles connaissances. Cependant, déceler les préconceptions n'est pas synonyme d'en tenir compte. Toujours selon Ghariz *et al.* (2023), durant la préparation de leurs séquences d'apprentissage, les enseignants sont focalisés sur la planification et la scénarisation du contenu ainsi que sur les objectifs du programme et non sur les conceptions. Ces dernières se renforcent alors et se maintiennent (Ghariz et al., 2023). Enfin, la manière dont les enseignants vont présenter la matière va également influencer la persistance des conceptions. L'importance de l'utilisation d'exemples concrets et d'expériences pour lutter contre les conceptions erronées a été soulignée par trois enseignants. Cette approche est soutenue par Kolb (1984), qui préconise que les élèves construisent leur apprentissage à travers des expériences actives. L'apprentissage actif reposant sur les connaissances préalables des élèves ainsi que le travail en collaboration

sont les bases du constructivisme. Cette théorie introduite par Piaget stipule que les enfants apprennent grâce à leurs propres expériences actives (Piaget, 1977). Smith *et al.* (1993) proposent un « *processus de changement conceptuel* ». « *Pour apprendre la science de manière significative, il faut donc réaligner, réorganiser ou remplacer les conceptions existantes pour les adapter à de nouvelles idées* ». Ce modèle de changement conceptuel a été développé par Posner *et al.* en 1982, ils suggèrent que quatre conditions sont nécessaires pour qu'une adaptation se produise dans la compréhension d'un individu :

- les conceptions existantes doivent être jugées insatisfaisantes,
- une nouvelle conception doit être suffisamment compréhensible. L'élève doit pouvoir comprendre comment structurer une expérience à partir de cette nouvelle conception,
- la nouvelle conception doit paraître plausible. Elle doit résoudre les problèmes des conceptions précédentes et s'accorder avec d'autres connaissances et expériences,
- la nouvelle conception doit permettre une ouverture de nouveaux champs de recherche et avoir un pouvoir explicatif ou technologique.

Notion du vivant

Une des questions importantes de ce travail porte sur l'ADN et le caractère vivant ou non que lui attribuent les élèves. Tout d'abord, il est surprenant de voir qu'il n'y a pas de différence significative entre les élèves ayant participé à des activités scientifiques extrascolaires et ceux n'y ayant pas participé. Ce résultat pourrait suggérer que les activités extrascolaires, dans leur forme actuelle, n'apportent pas de valeur ajoutée significative à la compréhension de concepts spécifiques comme la nature de l'ADN. Néanmoins, cette interprétation doit être prise avec prudence. En effet, il est essentiel de noter que l'ensemble des élèves n'ont pas participé à des activités portant spécifiquement sur l'ADN ; certains ont pu assister à des activités centrées sur la physique ou d'autres domaines scientifiques. Cette variété d'activités pourrait expliquer l'absence de différence significative. Une étude tenant compte du contenu spécifique des activités suivies par les élèves permettraient de mieux mesurer leur influence.

Un autre test statistique a été réalisé pour comparer les réponses des élèves des différents degrés avec, cette fois, une différence significative. Cela confirme que l'éducation et l'âge des élèves ont un impact sur leur compréhension concernant la nature de l'ADN. En effet, une majorité d'élèves du troisième degré reconnaît que l'ADN n'est pas un composé vivant (56%),

comparativement à seulement 37% des élèves du premier degré. Cette augmentation de la compréhension correcte de la nature de l'ADN pourrait refléter une maturation dans la pensée scientifique et une meilleure intégration des concepts biologiques enseignés au fil des années. Toutefois, il est notable que la proportion d'élèves considérant l'ADN comme vivant reste relativement stable entre le début et la fin du secondaire, avec respectivement 32% et 30%. Cette proportion est néanmoins moins importante que celle rapportée par C. De Ron ou Witzig *et al.* (60%). Une telle constance suggère que la conception de l'ADN comme entité vivante est une idée préconçue qui persiste chez une partie des élèves, malgré l'avancement dans le cursus scolaire.

La dernière question, en révélant les conceptions des élèves concernant la perception de l'ADN comme vivant, ouvre également la voie à la discussion plus large au sujet de leurs conceptions du vivant dans son ensemble. Lorsqu'il n'est pas précisé aux élèves de ne sélectionner que les caractéristiques essentielles du vivant, ceux-ci ont tendance à sélectionner un grand nombre de caractéristiques, cela reflète peut-être une incertitude quant aux critères déterminants. Il n'est pas étonnant de retrouver de telles hésitations chez les élèves puisque même les scientifiques s'accordent pour dire qu'il n'y a pas de définition claire et simple de la vie (Cain et al., 2006; Tsokolov, 2009). En outre, les résultats des entretiens avec les enseignants mettent aussi en lumière une grande diversité des critères essentiels du vivant avec cinq définitions distinctes relevées chez six enseignants. Cette variabilité reflète la complexité liée à la conceptualisation du vivant, un sujet qui a été largement discuté dans le travail de C. De Ron (2022). Cette multiplicité de définitions peut être source de confusion pour les élèves. Rolland et Marzin-Janvier soulignent la corrélation entre les difficultés rencontrées par les scientifiques pour parvenir à un accord sur la définition de la vie et les obstacles que les élèves rencontrent lorsqu'ils essaient de comprendre ce même concept. Si de nombreux scientifiques ont du mal à se défaire de l'« ombre » de l'animisme, c'est peut-être en raison de la complexité inhérente à l'étude du vivant, qui amène naturellement à réfléchir sur la signification de la vie (Rolland and Marzin-Janvier, 1996). Une constatation frappante quant aux différents critères choisis par les élèves est que les plus jeunes ont une vision anthropomorphiste ou zoocentriste du vivant. Les élèves du primaire et du D1 tendent à définir les êtres vivants comme des êtres qui bougent, ressentent des émotions, possèdent des organes, pensent et possèdent un système nerveux. Ces résultats sont cohérents avec ce que Elkind (1967) avance au sujet des adolescents. En effet, il a étendu et appliqué l'égocentrisme de Piaget aux enfants plus âgés ; il avance que l'égocentrisme de l'adolescent implique la croyance que les autres sont aussi préoccupés par lui

que lui-même, ce qui influence sa propre perception (Elkind, 1967; Piaget, 1995). Il est donc possible d'extrapoler cette théorie en la transposant à la biologie ; les élèves de primaire auraient une vision anthropomorphiste du vivant car ils ont tendance à le percevoir depuis leur propre perspective qu'ils pensent au centre de l'attention. Laurendeau et Pinard (1962) ont également défini plusieurs stades de définition de la vie chez les enfants. Le troisième stade consiste à considérer uniquement les animaux (et plus rarement les plantes) comme vivants. Cette tendance à restreindre le monde du vivant au monde animal s'oppose à l'animisme décrit par Piaget. Il s'agit d'un mode de pensée que l'on retrouve chez les enfants de 4 à 6 ans dans lequel « *la réalité toute entière tend à être conçue comme peuplée d'êtres animés, dotés d'un vouloir-être et d'un vouloir-faire plus ou moins conscient* » (Fondation Jean Piaget, 2024). Cela se retrouve dans le témoignage de l'enseignant 1 qui parle de certains élèves qui voient la mer ou encore les ordinateurs comme vivants. Une autre information importante est l'amélioration des scores du QCM avec l'avancement scolaire, ce qui suggère que l'éducation contribue positivement à la compréhension des caractéristiques du vivant.

Une autre préconception très importante a été mise en avant : tous niveaux confondus, les élèves ne considèrent la respiration qu'au sens strict de la ventilation. Cette conception erronée peut également venir d'une vision anthropomorphiste du vivant mais aussi de lacunes dans l'enseignement de la biologie comme l'avancent Anderson *et al.* (1990). En effet, ils relevaient déjà ce type de raisonnement chez des étudiants entrant à l'université. Au lieu de donner la définition de la respiration cellulaire, la majorité des élèves ou des étudiants restent également cantonnés à la définition de la ventilation (Anderson et al., 1990; Bouzazi, 2019; Deshmukh, 2015; Michael et al., 1999). Si le concept de respiration n'est pas très clair pour les élèves, il ne l'est guère davantage pour les enseignants. Seulement deux d'entre eux ont identifié clairement la respiration comme processus permettant de produire de l'énergie. Si les enseignants ne sont pas au clair avec cette définition, cela peut renforcer les conceptions des élèves (Feltovich et al., 1989; Jacobs, 1989; Modell et al., 2005; Yates and Marek, 2014). R. Bouzazi (2019) souligne pourtant l'importance de « *tenir compte des conceptions des élèves dans les pratiques de classe et de penser des situations didactiques permettant le dépassement des obstacles sous-jacents, pour une meilleure construction des concepts scientifiques* ». Elle préconise d'adopter une approche socio-constructiviste dans le processus d'enseignement-apprentissage du concept de la respiration (Bouzazi, 2019).

Concernant les QCM sur l'ADN et la génétique, il est intéressant de voir que les élèves (principalement primaire et premier degré) ne relèvent pas la présence d'ADN dans les êtres vivants non animés, tels que les fruits. Cette observation traduit de nouveau la complexité de définir ce qui est vivant et ce qui ne l'est plus. Cela correspond aux observations d'un enseignant du D3 qui a également noté que ses élèves rencontrent des difficultés avec les fruits. Il ne s'agit pas d'une constatation isolée, Van der Keilen et Roy mettent en lumière que les enfants se basent sur le comportement apparent, statique ou mouvant, de la « chose » pour juger si elle est en vie. Cette absence de mouvement expliquerait donc pourquoi les jeunes éprouvent des difficultés à qualifier les végétaux de vivant (Van der Keilen and Roy, 1995). Ce phénomène est en lien avec la « plant blindness », une tendance humaine à ignorer et sous-estimer les plantes dans l'environnement. Des chercheurs ont démontré une préférence marquée pour les animaux par rapport aux plantes. Ce biais est probablement dû à l'immobilité des plantes et à leur capacité à se fondre visuellement dans leur environnement. Il pourrait également être influencé par des facteurs culturels, tels que l'accent mis sur les animaux dans l'enseignement de la biologie (Balding and Williams, 2016; Wandersee and Schussler, 1999)

Concept entendu tôt

L'importance d'un enseignement tenant compte des conceptions est crucial car certaines d'entre elles peuvent être très tenaces et persistantes, souvent parce que les jeunes sont exposés à certains concepts dès leur plus jeune âge. Par exemple, il faut noter que 25% des élèves de troisième et 50% des élèves de quatrième ont déjà entendu parler de l'ADN. Pour les élèves de cinquième et sixième primaire, la majorité d'entre eux a déjà aussi été exposée au terme « ADN ». Cependant, la familiarité avec le terme ne se traduit pas nécessairement par une compréhension conceptuelle. Une simple exposition à un vocabulaire ne suffit pas pour garantir une intégration des concepts sous-jacents (Anglin et al., 1993).

Aspect médiatique et esprit critique

La question sur la localisation de l'ADN relève certaines incompréhensions même si certaines conceptions sont justes. Par exemple, le fait que 48% des élèves de primaire localisent correctement l'ADN dans les cellules, lorsque la réponse est proposée dans un QCM, est encourageant, même s'il est possible que les élèves confondent les concepts de cellule et de molécule, mélangeant ainsi les niveaux microscopique et moléculaire (Marbach-Ad and Stavy, 2010). Pour autant, leur compréhension demeure superficielle et possiblement influencée par

des représentations médiatiques plutôt que scientifiques. L'association de l'ADN avec les empreintes digitales, les cheveux et la salive par les élèves pourrait refléter l'influence de séries policières ou de dessins animés, où ces éléments sont régulièrement utilisés pour résoudre des mystères ou identifier des individus. Cette influence médiatique sur la perception de l'ADN est soutenue par les travaux de Donovan et Venville (2012), entre autres, qui ont discuté de l'impact des médias sur la compréhension des élèves de primaire au sujet de l'ADN et de la génétique (Donovan and Venville, 2014, 2012; Mills Shaw et al., 2008).

La présence de telles conceptions est aussi relevée chez les secondaires avec la question sur l'utilisation de l'ADN. En effet, des conceptions erronées subsistent chez une fraction des élèves, comme le montre la confusion entre ADN et empreintes digitales (7% au D1 et 3% au D3) ou la croyance que toutes les séquences d'ADN sont répertoriées dans une banque de données (1% au D1 et 6% au D3). Cette dernière croyance provient sans doute d'une confusion ou d'un raccourci que les élèves font en découvrant, par exemple, le fonctionnement de la police scientifique. En effet, si l'on se rend sur le site d'Interpol, il est indiqué que « *les échantillons prélevés sur les scènes de crime ou sur les suspects, habituellement à partir du sang, des cheveux ou des fluides corporels, sont analysés, ce qui permet d'établir un profil d'ADN et de le comparer aux autres profils génétiques enregistrés dans une base de données.* ». Il n'est pas précisé directement que ces bases de données ne contiennent pas la totalité des profils ADN de la population. En effet, cette information est énoncée un peu plus bas sur la page ("ADN," n.d.). Il est donc probable que cette conception erronée provienne d'un manque d'information ou d'une vulgarisation abusive. Une autre explication est que les élèves peuvent avoir l'impression d'être constamment surveillés. L'augmentation de la collecte de données et les avancées technologiques peuvent amener les jeunes à développer des inquiétudes au sujet de la confidentialité.

Du côté des six enseignants interrogés, seulement la moitié ont mentionné l'influence des médias. Cela pourrait signifier que ces enseignants ne sont pas conscients de l'origine des préconceptions de leurs élèves ou même qu'ils ignorent l'existence de ces conceptions. Alternativement, cela pourrait indiquer que les médias ont eu moins d'impact sur les élèves de ces enseignants. Enfin, il est possible qu'ils attribuent ces préconceptions à d'autres causes. Par exemple, l'impact de la culture et du milieu socio-économique sur les conceptions des enfants, cité par deux enseignants, est également documenté dans la littérature. Coley et Tanner (2012) indiquent que les expériences culturelles et l'environnement dans lequel les enfants grandissent

influencent leur compréhension du monde. Cela sous-entend que les enseignants doivent être conscients de ces facteurs et les intégrer dans leur manière de donner cours pour favoriser un enseignement de la biologie plus inclusif.

Un argument important en faveur de l'influence des médias sur les élèves est qu'ils passent énormément de temps sur les écrans. Selon une étude de l'Ipsos concernant les jeunes de 7 à 12 ans, ceux-ci passent en moyenne 9h par semaine devant les écrans et possèdent en moyenne 1,6 écrans personnels (Schmutz and Guillaume, 2022). Face à l'abondance d'informations et leur disponibilité permises par les technologies de l'information et de la communication, il est essentiel de développer des stratégies d'enseignement qui encouragent les élèves à développer leur esprit critique (Szafrajzen, 2021). A. Ricord (2015) souligne que l'éducation aux médias par la presse écrite constitue un bon moyen de les intéresser et de travailler à la fois l'éducation à la citoyenneté, le développement de l'esprit critique et la maîtrise de la langue française. Un des enseignants de primaire interrogés a d'ailleurs également fait mention de la difficulté qu'ont les jeunes à distinguer le réel du fictif.

La génétique dans les curriculum

La génétique est un pilier dans l'éducation scientifique moderne, car elle joue un rôle important dans de nombreux aspects de notre vie, de la santé à l'agriculture, en passant par la compréhension de notre propre hérédité (Li and Samulski, 2020; Stanziani, 2024; Wang et al., 2022). Il est donc impératif que les élèves acquièrent une solide maîtrise des principes de base de la génétique, non seulement pour exceller académiquement, mais aussi pour devenir des citoyens informés, capables de participer activement aux débats et décisions qui façonnent notre société. Le champ de la génétique évolue à une vitesse vertigineuse, avec de nombreuses découvertes et avancées sur ces dernières années. Cependant, le contenu des programmes scolaires n'évolue pas au même rythme et peut donc sembler dépassé. Néanmoins, il serait contre-productif d'introduire des concepts plus complexes dans les curriculum puisque les élèves peinent à assimiler les bases et entretiennent de nombreuses conceptions erronées.

5. Conclusion

La biologie, en tant que discipline scientifique, représente un aspect essentiel mais complexe de l'éducation des élèves. Sa complexité provient, entre autres, de la difficulté inhérente à définir ce qui est vivant, une question qui suscite encore des débats parmi les scientifiques eux-mêmes. À cela vient s'ajouter une autre difficulté : les élèves arrivent en classe en possédant des conceptions déjà bien ancrées sur des sujets tels que le vivant, l'ADN ou la génétique. Les jeunes sont parfois très tôt exposés à des médias où circulent des informations sur l'ADN et la génétique, qui ne sont pas toujours exactes. Cela laisse penser que les médias sont la source principale de ces idées préconçues même s'il faut garder à l'esprit qu'en déterminer l'origine précise est une tâche ardue. Ce travail a permis d'aboutir à plusieurs conclusions. Tout d'abord, il existe une multitude de conceptions chez les élèves de primaire et de secondaire, dont certaines que l'on peut vraisemblablement attribuer à une vision « médiatique ». Ensuite, ces conceptions, heureusement, peuvent évoluer au fur et à mesure du parcours scolaire des élèves influencées par divers facteurs. Enfin, concernant les enseignants, deux constatations peuvent être mises en avant. D'une part, ce travail confirme la présence d'une diversité de conceptions parmi les enseignants interrogés. D'autre part, les interviews montrent que les enseignants ne considèrent pas encore assez les préconceptions. Ceux-ci doivent fournir des efforts pour les intégrer activement dans leurs pratiques quotidiennes. L'approche constructiviste est une des pistes qui permet d'établir une compréhension solide et nuancée de la biologie.

Pour approfondir ce sujet de recherche, il serait intéressant d'analyser les facteurs qui influencent positivement les conceptions des élèves. Par exemple, se pencher davantage sur l'influence des activités scientifiques extrascolaires, d'une séquence spécifiquement conçue pour corriger certaines préconceptions, pourrait s'avérer pertinent. Pour ma part, élaborer ce mémoire m'a permis d'envisager la didactique sous un autre angle. En effet, sachant maintenant l'importance de l'influence des conceptions des élèves sur leur apprentissage scientifique, je veillerai systématiquement à en tenir compte dans ma pratique pour leur inculquer un savoir rigoureux.

6. Annexes

Annexe 1 : *Test préliminaire primaire*

1. Complète la phrase suivante :
Je regarde la télévision ou tout autre écran jours par semaine.
2. Cite tes séries ou dessins animés préférés
3. Qu'est-ce qu'un être vivant ?
4. As-tu déjà entendu parler du mot ADN ? OUI- NON
5. Selon toi, qu'est-ce que l'ADN ?
6. Est-ce que tu sais où on peut trouver de l'ADN ? Où se situe l'ADN dans notre corps ?
7. À quoi sert l'ADN dans notre corps ?
8. L'ADN est-il vivant ? Si oui, pourquoi ?
9. As-tu déjà participé à des activités scientifiques ? Si oui, lesquelles ?

Annexe 2 : *Tableau des réponses données par les élèves du D1 et D3 à la question « Définis avec tes mots la notions d'être vivant. »*

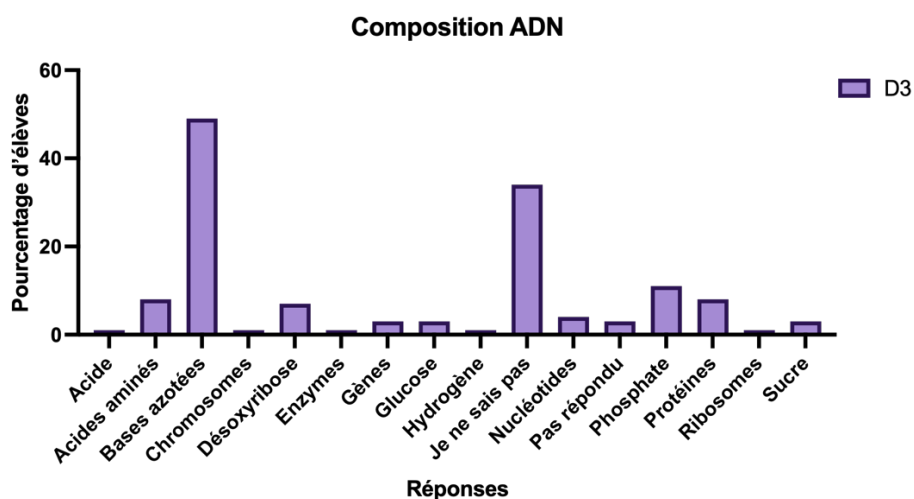
Réponses	D1	D3	Total général
Contient de l'ADN		4	4
Animaux	4	2	6
Bouger	12	1	13
Cellules	9	12	21
Communication	1		1
Dormir	1	1	2
Échanges	12	11	23
Émotions	3	1	4
Événement de vie	13	23	36
Évoluer	2	4	6
Gènes		1	1
Grandir	21	14	35
Homme	3	2	5
Je ne sais pas	7		7
Molécules		1	1
Organes	5	2	7
Pas répondu	4	2	6
Pense	1	1	2

Respirer	49	37	86
Se nourrir	53	33	86
Se reproduire	37	39	76
Stimuli	1	8	9
Système nerveux	2		2
Unicellulaire		2	2
Végétaux	3	2	5
Total général	243	203	446

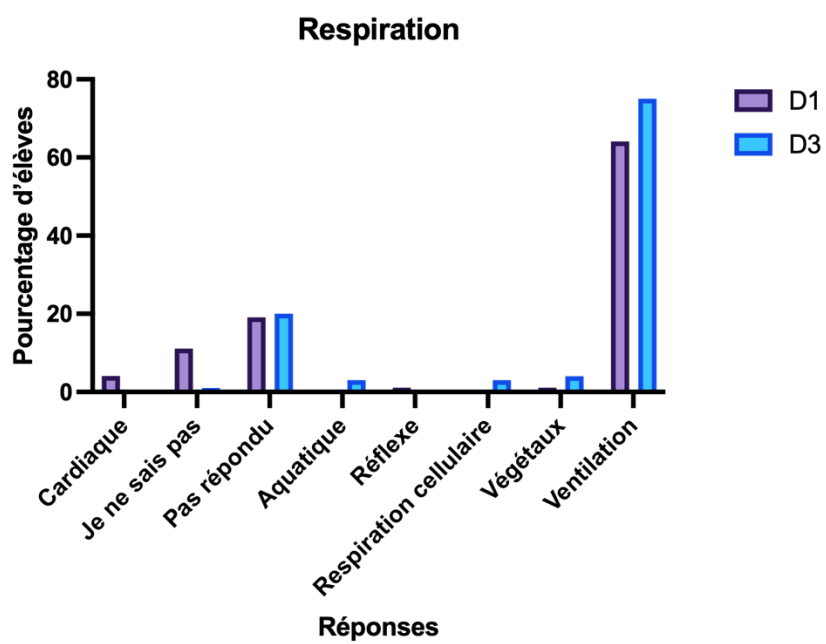
Annexe 3 : Tests du χ^2 réalisés sur Prism pour la question portant sur le caractère vivant de l'ADN (Q3)

"Table Analyzed"	"Q3 Khi2"	"Table Analyzed"	"Q3 khi2 acti"
"P value and statistical significance"		"P value and statistical significance"	
" Test" Chi-square		" Test" Chi-square	
" Chi-square, df" "8.733, 3"		" Chi-square, df" "1.940, 3"	
" P value" 0,0331		" P value" 0,5850	
" P value summary" *		" P value summary" ns	
" One- or two-sided" NA		" One- or two-sided" NA	
" Statistically significant (P < 0.05)?"	Yes	" Statistically significant (P < 0.05)?"	No
"Data analyzed"		"Data analyzed"	
" Number of rows" 4		" Number of rows" 4	
" Number of columns" 2		" Number of columns" 2	

Annexe 4 : Graphe reprenant les fréquences des réponses à la question « quelles sont les principales composantes de la structure de l'ADN ? »



Annexe 5 : Graphe reprenant les fréquences des réponses à la question portant sur la respiration.



7. Bibliographie

ADN [WWW Document], n.d. URL <https://www.interpol.int/fr/Notre-action/Police-scientifique/ADN> (accessed 5.13.24).

Allain, J.-C., 1995. Un dispositif didactique utilisant des images pour faire évoluer les conceptions des élèves de dix ans sur les séismes. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales* 21, 109–135. <https://doi.org/10.4267/2042/8638>

An Integrated Encyclopedia of DNA Elements in the Human Genome, 2012. . *Nature* 489, 57–74. <https://doi.org/10.1038/nature11247>

Anderson, C.W., Sheldon, T.H., Dubay, J., 1990. The effects of instruction on college nonmajors' conceptions of respiration and photosynthesis. *Journal of Research in Science Teaching* 27, 761–776. <https://doi.org/10.1002/tea.3660270806>

Anglin, J.M., Miller, G.A., Wakefield, P.C., 1993. Vocabulary Development: A Morphological Analysis. *Monographs of the Society for Research in Child Development* 58, i–186. <https://doi.org/10.2307/1166112>

Armstrong, R.A., 2014. When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic and Physiological Optics* 34, 502–508. <https://doi.org/10.1111/opo.12131>

Ayrinhac, M., Bru, A., 2019. Les conceptions initiales des élèves en sciences.

Bachelard, G., 1993. *La formation de l'esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance*, 15e tirage. ed, Bibliothèque des textes philosophiques. J. Vrin, Paris.

Balding, M., Williams, K.J.H., 2016. Plant blindness and the implications for plant conservation. *Conservation Biology* 30, 1192–1199. <https://doi.org/10.1111/cobi.12738>

BienEnseigner, É. de, 2022. La transposition didactique : définition et exemples. *Bien Enseigner*. URL <https://www.bienenseigner.com/transposition-didactique/> (accessed 7.10.23).

Biologie (2e édition) - Raven, Johnson, Mason, Singer Losos - De Boeck Supérieur - Grand format - La Procure Tournai Tournai, n.d.

Borrelli, V.M.G., Brambilla, V., Rogowsky, P., Marocco, A., Lanubile, A., 2018. The Enhancement of Plant Disease Resistance Using CRISPR/Cas9 Technology. *Front Plant Sci* 9, 1245. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01245>

Bouchard, C., Fréchette, N., Bégin, C., Cadoret, G., Charron, A., Rigal, R., Roy, E., Simpson, C.B., Pagé, P., 2011. *Le développement global de l'enfant de 6 à 12 ans en contextes éducatifs*, 1st ed. Presses de l'Université du Québec. <https://doi.org/10.2307/j.ctv18ph35n>

Bouzazi, R., 2019. Conceptions de la respiration chez des élèves tunisiens du cycle préparatoire et du cycle secondaire de l'enseignement. *Educational Journal of the University of Patras UNESCO Chair*. <https://doi.org/10.26220/une.3117>

Briggs, A.G., Hughes, L.E., Brennan, R.E., Buchner, J., Horak, R.E.A., Amburn, D.S.K., McDonald, A.H., Primm, T.P., Smith, A.C., Stevens, A.M., Yung, S.B., Paustian, T.D., 2017.

Concept Inventory Development Reveals Common Student Misconceptions about Microbiology. *Journal of Microbiology & Biology Education* 18, 10.1128/jmbe.v18i3.1319. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v18i3.1319>

Cain, M.L., Damman, H., Lue, R.A., Yoon, C.K., 2006. Découvrir la biologie. De Boeck Supérieur.

Campbell, N.A., 2020. *Campbell biology*, 11e éd. ed. Pearson, Montréal.

Clément, P., 1991. Sur la persistance d'une conception : la tuyauterie continue digestion-excrétion. *Aster : Recherches en didactique des sciences expérimentales* 13, 133–156. <https://doi.org/10.4267/2042/9100>

Coley, J.D., Tanner, K.D., 2012. Common Origins of Diverse Misconceptions: Cognitive Principles and the Development of Biology Thinking. *CBE Life Sci Educ* 11, 209–215. <https://doi.org/10.1187/cbe.12-06-0074>

Colomb, J., 1986. Chevallard (Yves). — La Transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné. *Revue française de pédagogie* 76, 89–91.

Correia de Sousa, M., Gjorgjieva, M., Dolicka, D., Sobolewski, C., Foti, M., 2019. Deciphering miRNAs' Action through miRNA Editing. *Int J Mol Sci* 20, 6249. <https://doi.org/10.3390/ijms20246249>

Crick, F.H., Barnett, L., Brenner, S., Watts-Tobin, R.J., 1961. General nature of the genetic code for proteins. *Nature* 192, 1227–1232. <https://doi.org/10.1038/1921227a0>

Dahmani, H.-R., Schneeberger, P., 2011. Enseigner le concept d'ADN en lien avec la démarche historique : un processus de modélisation négociée. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies* 55–82. <https://doi.org/10.4000/rdst.374>

de Fraga, F.B.F.F., 2018. Towards an Evolutionary Perspective in Teaching and Popularizing Microbiology. *Journal of Microbiology & Biology Education* 19, 10.1128/jmbe.v19i1.1531. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v19i1.1531>

De Ron, C., 2022. Quelles sont les difficultés rencontrées par les étudiants de premier cycle pour définir la notion du vivant à l'échelle microscopique ?

Deshmukh, N.D., 2015. Why Do School Students Have Misconceptions About Life Processes?, in: Gnanamalar Sarojini Daniel, E. (Ed.), *Biology Education and Research in a Changing Planet*. Springer, Singapore, pp. 31–43. https://doi.org/10.1007/978-981-287-524-2_4

Donovan, J., Venville, G., 2014. Blood and Bones: The Influence of the Mass Media on Australian Primary School Children's Understandings of Genes and DNA. *Sci & Educ* 23, 325–360. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9491-3>

Donovan, J., Venville, G., 2012. Exploring the influence of the mass media on primary students' conceptual understanding of genetics. *Education 3-13* 40, 75–95. <https://doi.org/10.1080/03004279.2012.635058>

- Doudna, J.A., Charpentier, E., 2014. Genome editing. The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science* 346, 1258096. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
- Duncan, R.G., Freidenreich, H.B., Chinn, C.A., Bausch, A., 2011. Promoting Middle School Students' Understandings of Molecular Genetics. *Res Sci Educ* 41, 147–167. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9150-0>
- Duncan, R.G., Reiser, B.J., 2007. Reasoning across ontologically distinct levels: Students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching* 44, 938–959. <https://doi.org/10.1002/tea.20186>
- Duncan, R.G., Tseng, K.A., 2011. Designing project-based instruction to foster generative and mechanistic understandings in genetics: Fostering Generative Understandings in Genetics. *Sci. Ed.* 95, 21–56. <https://doi.org/10.1002/sce.20407>
- Elkind, D., 1967. Egocentrism in Adolescence. *Child Development* 38, 1025–1034. <https://doi.org/10.2307/1127100>
- Feltovich, P.J., Spiro, P., Coulson, R., 1989. The nature of conceptual understanding in biomedicine: The deep structure of complex ideas and the development of misconceptions. In: *Cognitive Science in Medicine: Biomedical Modeling*.
- Fire, A., Xu, S., Montgomery, M.K., Kostas, S.A., Driver, S.E., Mello, C.C., 1998. Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans*. *Nature* 391, 806–811. <https://doi.org/10.1038/35888>
- Fondation Jean Piaget, 2024. Fondation Jean Piaget - Détail Notion [WWW Document]. URL https://www.fondationjeanpiaget.ch/fjp/site/oeuvre/index_notions_nuage.php?NOTIONID=29 (accessed 6.2.24).
- Ghariz, G., Boucetta, N., Boubih, S., Alaoui, M.E., Idrissi, R.J., Seghir, H., 2023. L'approche Constructiviste dans l'Enseignement des Sciences de la Vie et de la Terre au Maroc. *SHS Web Conf.* 175, 01008. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202317501008>
- Giordan, A., Vecchi, G. de, 1994. Les origines du savoir: des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques, 2. éd. ed, *Actualités pédagogiques et psychologiques*. Delachaux et Niestlé, Lausanne.
- Gooday, M., 1996. Primary Pre-service Courses in Science: A basis for review and innovation. *Journal of Education for Teaching*. <https://doi.org/10.1080/02607479650038454>
- Hallast, P., Ebert, P., Loftus, M., Yilmaz, F., Audano, P.A., Logsdon, G.A., Bonder, M.J., Zhou, W., Höps, W., Kim, K., Li, C., Hoyt, S.J., Dishuck, P.C., Porubsky, D., Tsetsos, F., Kwon, J.Y., Zhu, Q., Munson, K.M., Hasenfeld, P., Harvey, W.T., Lewis, A.P., Kordosky, J., Hoekzema, K., Human Genome Structural Variation Consortium (HGSVC), O'Neill, R.J., Korbel, J.O., Tyler-Smith, C., Eichler, E.E., Shi, X., Beck, C.R., Marschall, T., Konkel, M.K., Lee, C., 2023. Assembly of 43 human Y chromosomes reveals extensive complexity and variation. *Nature* 621, 355–364. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06425-6>

How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition, 2000. . National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/9853>

Jacobs, G., 1989. Word usage misconceptions among first-year university physics students. *International Journal of Science Education* 11, 395–399. <https://doi.org/10.1080/0950069890110404>

Ke, C., Kaya, D., 2007. DETERMINATION OF MISCONCEPTIONS THAT ARE ENCOUNTERED BY TEACHER CANDIDATES AND SOLUTION PROPOSITIONS FOR RELIEVING OF THESE MISCONCEPTIONS. *The Turkish Online Journal of Educational Technology* 6.

Kenjo, E., Hozumi, H., Makita, Y., Iwabuchi, K.A., Fujimoto, N., Matsumoto, S., Kimura, M., Amano, Y., Ifuku, M., Naoe, Y., Inukai, N., Hotta, A., 2021. Low immunogenicity of LNP allows repeated administrations of CRISPR-Cas9 mRNA into skeletal muscle in mice. *Nat Commun* 12, 7101. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26714-w>

Kikas, E., 2004. Teachers' conceptions and misconceptions concerning three natural phenomena. *Journal of Research in Science Teaching* 41, 432–448. <https://doi.org/10.1002/tea.20012>

Klug, A., 1968. Rosalind Franklin and the Discovery of the Structure of DNA. *Nature* 219, 808–810. <https://doi.org/10.1038/219808a0>

Knippels, M.-C.P.J., Waarlo, A.J., Boersma, K.T., 2010. Design criteria for learning and teaching genetics. *Journal of Biological Education*.

Kolb, D., 1984. Experiential Learning: Experience As The Source Of Learning And Development, *Journal of Business Ethics*.

Laurendeau, M., Pinard, A., 1962. La pensée causale: Étude génétique et expérimentale. *FeniXX*.

Lewis, J., Kattmann, U., 2004. Traits, genes, particles and information: re-visiting students' understandings of genetics. *International Journal of Science Education* 26, 195–206.

Lewis, J., Leach, J., Wood-Robinson, C., 2000. Chromosomes: The missing link - Young people's understanding of mitosis, meiosis, and fertilisation. *Journal of Biological Education - J BIOL EDUC* 34, 189–199. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655717>

Li, C., Samulski, R.J., 2020. Engineering adeno-associated virus vectors for gene therapy. *Nat Rev Genet* 21, 255–272. <https://doi.org/10.1038/s41576-019-0205-4>

Machová, M., Ehler, E., 2021. Secondary school students' misconceptions in genetics: origins and solutions. *Journal of Biological Education* 0, 1–14. <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1933136>

Marandola, L., Fierz, S., 2017. Du savoir savant au savoir à enseigner, une transposition complète.

Marbach-Ad, G., Stavy, R., 2010. Students' cellular and molecular explanations of genetic phenomena. *Journal of Biological Education*.

Mason, K.A., Losos, J.B., Singer, S.R., Raven, P.H., 2017. *Biology*, Eleventh edition. ed. McGraw-Hill Education, New York, NY.

Michael, J.A., Richardson, D., Rovick, A., Modell, H., Bruce, D., Horwitz, B., Hudson, M., Silverthorn, D., Whitescarver, S., Williams, S., 1999. Undergraduate students' misconceptions about respiratory physiology. *Advances in Physiology Education* 277, S127. <https://doi.org/10.1152/advances.1999.277.6.S127>

Mills Shaw, K.R., Van Horne, K., Zhang, H., Boughman, J., 2008. Essay Contest Reveals Misconceptions of High School Students in Genetics Content. *Genetics* 178, 1157–1168. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.084194>

Modell, H., Michael, J., Wenderoth, M.P., 2005. Helping the Learner to Learn: The Role of Uncovering Misconceptions. *The American Biology Teacher* 67, 20–26. <https://doi.org/10.2307/4451776>

Morin, M., 2016. L'importance de prendre en compte les conceptions initiales pour construire un concept scientifique 86.

Paun, E., 2006. Transposition didactique : un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l'éducation* 22, 3–13. <https://doi.org/10.3917/cdle.022.0003>

Pelle, A., Poitevin, S., Morin, M., 2016. L'importance de prendre en compte les conceptions initiales pour construire un concept scientifique.

Pennisi, E., 2012. Genomics. ENCODE project writes eulogy for junk DNA. *Science* 337, 1159, 1161. <https://doi.org/10.1126/science.337.6099.1159>

Perrenoud, P., 1998. La transposition didactique à partir de pratiques : des savoirs aux compétences. *rse* 24, 487–514. <https://doi.org/10.7202/031969ar>

Piaget, J., 1995. *Psychologie et pédagogie*, Collection folio Essais. Denoël/Gonthier, Paris.

Piaget, J., 1977. *La Construction du réel chez l'enfant* / Jean Piaget. Delachaux et Niestlé. Neuchatel(Suisse).

Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., Gertzog, W.A., 1982. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education* 66, 211–227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>

Reverdy, C., 2018. *Les recherches en didactique pour l'éducation scientifique et technologique*.

Ricord, A., 2015. En quoi l'éducation aux médias par la presse écrite permet de développer l'esprit critique et les compétences sociales et civiques d'élèves de CM1 ? 82.

Rolland, A., Marzin-Janvier, P., 1996. Étude des critères du concept de vie chez des élèves de

- sixième. *Didaskalia* (Paris) 57–82. <https://doi.org/10.4267/2042/23787>
- Saavedra, R., Marzin-Janvier, P., Girault, I., 2013. Comment une situation d’investigation policière fait évoluer les conceptions d’élèves de troisième sur l’ADN. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies* 77–106. <https://doi.org/10.4000/rdst.698>
- Schmutz, B., Guillaume, M., 2022. Malgré un temps croissant passé sur les écrans, les jeunes lisent toujours autant ! | Ipsos [WWW Document]. URL <https://www.ipsos.com/fr-fr/malgre-un-temps-croissant-passe-sur-les-ecrans-les-jeunes-lisent-toujours-autant> (accessed 5.24.24).
- Simard, C., 2021. Microorganism education: misconceptions and obstacles. *Journal of Biological Education* 57, 1–9. <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1909636>
- Smith, E.L., Blakeslee, T.D., Anderson, C.W., 1993. Teaching strategies associated with conceptual change learning in Science. *Journal of Research in Science Teaching* 30, 111–126. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300202>
- Soetewey, S., Duroisin, N., Demeuse, M., 2011. Le curriculum oublié. *Revue internationale d’éducation de Sèvres* 123–134. <https://doi.org/10.4000/ries.1067>
- Sommeillier, R., Robert, F., 2018. Les préconceptions en didactiques des sciences: constamment affinées, si peu exploitées.
- Stanziani, A., 2024. La bataille mondiale des semences. Des hybrides aux nouveaux OGM. *Multitudes* 95, 147–152. <https://doi.org/10.3917/mult.095.0147>
- Szafrajzen, B., 2021. Sensibiliser et développer l’esprit critique par l’éducation aux médias et à l’information. Le cas d’un collège de l’académie de Montpellier. *Les Cahiers du numérique* 17, 17–34. <https://doi.org/10.3166/LCN.2021.011>
- Tall, G., 1989. The processes of curriculum development and evaluation. *Journal of Curriculum Studies* 21, 271–276. <https://doi.org/10.1080/0022027890210306>
- Travers, A., Muskhelishvili, G., 2015. DNA structure and function. *The FEBS Journal* 282, 2279–2295. <https://doi.org/10.1111/febs.13307>
- Treagust, D., 1986. Evaluating students’ misconceptions by means of diagnostic multiple choice items. *Research in Science Education - RES SCI EDUC* 16, 199–207. <https://doi.org/10.1007/BF02356835>
- Tsokolov, S.A., 2009. Why Is the Definition of Life So Elusive? Epistemological Considerations. *Astrobiology* 9, 401–412. <https://doi.org/10.1089/ast.2007.0201>
- Tsui, C., Treagust, D., 2010. Evaluating Secondary Students’ Scientific Reasoning in Genetics Using a Two-Tier Diagnostic Instrument. *International Journal of Science Education* 32, 1073–1098. <https://doi.org/10.1080/09500690902951429>
- Van der Keilen, M., Roy, C., 1995. Développement du concept de vie à propos des animaux et des plantes. *Enfance* 48, 435–442. <https://doi.org/10.3406/enfan.1995.2147>
- von Kotzebue, L., Förtsch, C., Förtsch, S., Neuhaus, B.J., 2022. Dealing with Student Errors in Whole-Class Discussions of Biology Lessons at German Secondary Schools. *Int J of Sci and Math Educ* 20, 459–480. <https://doi.org/10.1007/s10763-021-10171-4>

- Vosniadou, S., 1994. Capturing and modeling the process of conceptual change - ScienceDirect [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0959475294900183> (accessed 5.20.24).
- Wandersee, J.H., Schussler, E.E., 1999. Preventing Plant Blindness. *The American Biology Teacher* 61, 82–86. <https://doi.org/10.2307/4450624>
- Wang, Y.-M., Lu, S.-Y., Zhang, X.-J., Chen, L.-J., Pang, C.-P., Yam, J.C., 2022. Myopia Genetics and Heredity. *Children* 9, 382. <https://doi.org/10.3390/children9030382>
- Watson, J.D., Crick, F.H.C., 1953. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature* 171, 737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
- WBE [WWW Document], 2014. . Wallonie-Bruxelles Enseignement. URL <https://www.wbe.be/> (accessed 6.10.23).
- Wisch, J.K., Farrell, E., Siegel, M., Freyermuth, S., 2018. Misconceptions and persistence: resources for targeting student alternative conceptions in biotechnology. *Biochemistry and Molecular Biology Education* 46, 602–611. <https://doi.org/10.1002/bmb.21176>
- Witzig, S.B., Freyermuth, S.K., Siegel, M.A., Izci, K., Pires, J.C., 2013. Is DNA Alive? A Study of Conceptual Change Through Targeted Instruction. *Res Sci Educ* 43, 1361–1375. <https://doi.org/10.1007/s11165-012-9311-4>
- Wood-Robinson, C., Lewis, J., Leach, J., 2000. Young people's understanding of the nature of genetic information in the cells of an organism. *Journal of Biological Education* 35, 29–36. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655732>
- Yates, T.B., Marek, E.A., 2014. Teachers teaching misconceptions: a study of factors contributing to high school biology students' acquisition of biological evolution-related misconceptions. *Evo Edu Outreach* 7, 7. <https://doi.org/10.1186/s12052-014-0007-2>