

Enseignement de la génétique au secondaire : revue systématique d'une décennie de recherches empiriques en sciences de l'éducation (2009-2019)



Sous la direction de Pierre Chastenay

Marianne Bissonnette, Marianne Bourdeau, Marilou Charron, Sarah Mainville

**Enseignement de la génétique au secondaire :
revue systématique d'une décennie
de recherches empiriques en sciences de l'éducation
(2009-2019)**

**Enseignement de la génétique au secondaire :
revue systématique d'une décennie
de recherches empiriques en sciences de l'éducation
(2009-2019)**

Sous la direction de Pierre Chastenay

Marianne Bissonnette

Marianne Bourdeau

Marilou Charron

Sarah Mainville

Crédits photos et illustrations

Emplacement	Crédit
Couverture	Illustration Jaime Jacob
p. 16	Banque d'images
p. 21	Banque d'images
p. 22	Image Génome Québec
p. 24	Image Génome Québec
p. 50	Banque d'images
p. 66	Pseudonyme de l'auteur : <i>Opabinia regalis</i> , CC BY-SA 3.0
p. 74	Banque d'images
p. 79	Image Génome Québec
p. 90	Banque d'images
p. 100	Banque d'images
p. 108	Image Génome Québec
p. 116	Banque d'images
p. 128	Image Génome Québec
p. 142	Auteur inconnu, libre de droits via Wikimedia Commons
p. 150	Banque d'images
p. 170	Banque d'images
p. 188	Henk Caspers/Naturalis Biodiversity Center, CC BY-SA 3.0
p. 194	Image Génome Québec
p. 198	The Open University, V.F. et adaptation par T. Lombry
p. 208	Banque d'images
p. 222	Banque d'images
4 ^e de couverture	Banque d'images

Révision linguistique et stylistique : Isabelle Navarro

Recherche iconographique : Noémie Poirier Stewart

Mise en page : Alejandro Natan

ISBN Imprimé : 978-2-9817238-1-9

ISBN PDF : 978-2-9817238-2-6

ISBN ePUB : 978-2-9817238-3-3

Dépôt légal : 2021

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

© 2021 - Génome Québec et EREST

Tous droits de reproduction, d'adaptation ou de traduction réservés pour tous pays.

Table des matières

Génome Québec – Mission et vision	7
EREST – Qui sommes-nous?	9
Préface	13
Problématique de la recherche	17
Présentation du rapport	27
Question de recherche	27
Constitution du corpus	28
Description du corpus.....	31
<i>Nombre d'articles selon l'âge moyen des élèves</i>	31
<i>Nombre d'articles par année de publication</i>	32
<i>Nombre d'articles par publication</i>	33
<i>Nombre d'articles par pays où la recherche a été menée</i>	35
<i>Principaux thèmes abordés dans les articles recensés</i>	36
<i>Nombre d'articles par méthode de recherche</i>	37
Principaux constats (sommaire exécutif)	38
<i>Description des principales interventions</i>	
<i>éducatives répertoriées</i>	38
<i>Principaux résultats de la recherche</i>	40
<i>Principales recommandations issues des articles recensés</i>	43
Limites de la recherche	46
Présentation des résultats	51
Progressions des apprentissages en génétique	
au secondaire.....	51
Apprentissage des différents niveaux d'organisation	
en génétique (modèles individuels,	
cellulaires et moléculaires)	67
Conceptions et changement conceptuel en génétique.....	75
Stratégies d'enseignement en génétique.....	91

ENSEIGNEMENT DE LA GÉNÉTIQUE AU SECONDAIRE

<i>Libre choix des élèves dans l'apprentissage de la génétique</i>	101
<i>Activités de résolution de problèmes en génétique</i>	103
<i>Utilisation d'images et d'animations vidéo pour l'enseignement de la génétique</i>	109
<i>Modèles et modélisation</i>	117
Apprentissages en laboratoire.....	129
Inclusion de l'histoire des sciences et de la nature de l'activité scientifique dans l'enseignement de concepts en génétique..	143
Développement des compétences argumentatives à propos de questions socioscientifiques en génétique	151
Enseignement de la génétique assisté par ordinateur : programmes, jeux et plateformes informatiques.....	171
Enseignement interdisciplinaire de concepts en génétique	189
Sciences citoyennes et apprentissage de la génétique.....	195
Enseignement de la théorie de l'évolution des espèces par sélection naturelle	199
Enseignement de la génétique, essentialisme génétique et discrimination basée sur les gènes	209
Difficultés avec le vocabulaire et les termes en génétique.....	220
Bibliographie	223
Liste des articles recensés	237

Génome Québec – Mission et vision

Génome Québec est un organisme privé à but non lucratif fondé en 2000. Cet organisme joue un rôle de premier plan dans le développement stratégique et scientifique de la génomique en finançant des projets de recherche et en accompagnant les chercheuses et les chercheurs d'ici en vue d'atteindre un niveau d'expertise d'envergure internationale. La génomique, une technologie de rupture qui révolutionne déjà les façons de faire et qui est là pour de bon, permet l'étude de l'ensemble du matériel génétique d'un organisme vivant, qu'il s'agisse d'un humain, d'une plante, d'un animal ou d'un microorganisme.

Au cours des dernières années, la génomique a transformé les sciences de la vie à plusieurs égards, par exemple en apportant des solutions qui contribuent à la croissance socio-économique du Québec. Elle permet d'innover, d'accélérer les découvertes et de trouver des solutions à plusieurs enjeux de notre société. Le Québec a toutes les raisons d'être fier des succès de ses chercheuses et ses chercheurs, lesquels sont reconnus à travers le monde pour la qualité de leurs travaux et pour les grandes découvertes réalisées ici même dans la province. Depuis plus de 20 ans, plus d'un milliard de dollars ont été investis dans la génomique par l'entremise de Génome Québec pour promouvoir le développement et l'excellence de la recherche dans ce domaine. Cela inclut des investissements des gouvernements provincial et fédéral, ainsi que ceux de nombreux autres partenaires. Pilier de la bioéconomie de

notre province, Génome Québec contribue au développement social et durable, mais également au rayonnement du Québec dans le monde.

La démocratisation des savoirs, l'éducation scientifique et l'intégration de la génomique dans les programmes scolaires constituent aussi des éléments essentiels pour effectuer un virage réussi vers une économie du savoir et une société mieux outillée pour prendre des décisions éclairées face à des enjeux complexes. Dans cette perspective, la mission éducative de Génome Québec est au cœur de sa vision stratégique et a pour objectif de sensibiliser le public et les jeunes aux sciences de la vie et de les informer sur le potentiel, les avancées et les enjeux associés aux technologies génomiques dans le but, ultimement, de stimuler leur intérêt pour les carrières en science.

De manière générale, Génome Québec souhaite mettre la génomique au service du citoyen, de l'industrie et de la société. En plus d'une plateforme de transfert des connaissances dédiée aux enseignantes et aux enseignants en sciences et à leurs élèves, nous développons des activités de science participative, afin de créer des ponts entre les chercheuses, les chercheurs et le public. Nous visons ainsi le développement de projets interactifs et collectifs dans une optique d'enrichissement de la littératie scientifique de toutes les Québécoises et tous les Québécois.

EREST – Qui sommes-nous ?

L'Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique (EREST) est un regroupement de chercheuses et chercheurs professionnels, d'étudiantes et étudiants de cycles supérieurs qui s'intéressent aux recherches et aux innovations favorisant le développement et l'efficacité de l'éducation en science et en technologie (ST), et ce, à tous les niveaux scolaires, incluant la formation des maîtres ainsi que les contextes éducatifs non formels (musées de science).

Basée à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), l'EREST est une équipe dynamique qui s'est fixé pour objectif de promouvoir toutes les initiatives de recherches pertinentes dans le domaine de l'enseignement de la ST, notamment par le biais de rencontres, de publications savantes et professionnelles, de séminaires thématiques et d'interventions dans des colloques, des congrès et auprès des médias. L'EREST poursuit également l'objectif de soutenir la qualité et le développement de la recherche en éducation et de la faire valoir auprès de différents acteurs sociaux (enseignantes et enseignants, parents, décideurs politiques et gouvernementaux, etc.). Ses activités se déploient le long de quatre axes principaux :

Axe 1 : Approches cognitives et neuroéducatives de l'apprentissage en ST

Au cours des dernières années, l'EREST a mis en évidence le rôle de certaines fonctions exécutives, comme l'inhibition, dans les apprentissages difficiles qui nécessitent des changements

conceptuels chez les apprenants. Elle a proposé un modèle de changement conceptuel qui fait aujourd'hui l'objet d'une certaine adhésion, mais aussi de débats au sein de la communauté scientifique internationale.

Axe 2 : Étude des facteurs et interventions qui influencent l'intérêt des jeunes à l'égard de la ST

Depuis 2012, la Chaire de recherche sur l'intérêt des jeunes à l'égard des sciences et de la technologie (CRIJEST) a posé les bases théoriques et méthodologiques d'une étude du lien affectif et cognitif qui existe entre les apprenants et l'objet « science et technologie » (portraits de populations, variables socioaffectives, effets d'interventions éducatives, etc.). L'équipe a aussi développé des méthodologies permettant d'étudier les variations de l'intérêt situationnel tel qu'il se manifeste en temps réel en utilisant des questionnaires « situationnels » ponctuels et des méthodes psychophysiologiques.

Axe 3 : Apprentissage et intérêt des jeunes à l'égard de la ST par le biais d'applications technologiques

Depuis ses débuts, l'EREST s'interroge sur le potentiel des applications technologiques (jeux vidéo, jeux sérieux, tableaux interactifs) pour améliorer l'apprentissage de la ST. L'équipe a effectué des recensions d'écrits, développé six jeux vidéo éducatifs scientifiques ainsi que des méthodologies permettant d'en évaluer les effets.

Axe 4 : Didactique et médiation scientifique

La qualité de l'enseignement (scolaire) et de la médiation scientifique (musées, planétariums, journalisme scientifique) est au cœur de la réussite du projet de conscientiser et d'éduquer le grand public à la ST. Avec le concours d'expertes et d'experts

de l'enseignement ainsi que de certaines têtes d'affiche emblématiques de la médiation scientifique, l'EREST lance un programme de recherche portant sur les succès et les écueils de ces pratiques sociales, mais aussi concernant ce que les connaissances en didactique peuvent apporter pour soutenir la médiation scientifique sous toutes ses formes.

Préface

La science occupe une place centrale dans nos vies. Nous l'utilisons pour prendre soin des gens qui nous sont chers, pour protéger les écosystèmes vulnérables, pour éclairer nos choix en matière d'alimentation et d'hygiène de vie et pour réfléchir au monde dans lequel nous vivons. Mais encore faut-il comprendre l'activité scientifique, ses processus et ses retombées concrètes. En constatant la vitesse ahurissante avec laquelle déferlent sur nous les avancées scientifiques et technologiques révolutionnaires des dernières années, il convient de s'interroger sur l'accessibilité des savoirs scientifiques aux décideurs et aux citoyens. Dans le contexte actuel, il est primordial de permettre à la population, et aux élèves du secondaire en particulier, de disposer d'un niveau de connaissance suffisant, et de faire preuve d'aisance et de discernement par rapport aux informations scientifiques.

C'est dans cette optique que Génome Québec a mandaté l'Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique de l'Université du Québec à Montréal, en particulier le professeur Pierre Chastenay et son équipe, pour mener à bien une recension systématique des articles scientifiques en sciences de l'éducation parus au cours des 10 dernières années et faisant état des approches didactiques et pédagogiques les plus prometteuses en ce qui concerne l'enseignement de la génétique et de la génomique au secondaire, approches basées sur des données probantes.

Nous souhaitons, par cette démarche, informer les acteurs et les décideurs scolaires des meilleures pratiques à adopter pour faciliter les apprentissages des principaux savoirs et concepts inhérents à la génétique et à la génomique par les élèves du secondaire. Nous désirons également, par la publication de ce rapport de recherche, susciter le développement d'outils et d'activités éducatives inspirés des meilleures pratiques qui ont cours à travers le monde afin de mieux outiller les enseignantes et les enseignants, ainsi que leurs élèves.

Nous espérons que cet ouvrage vous sera utile.

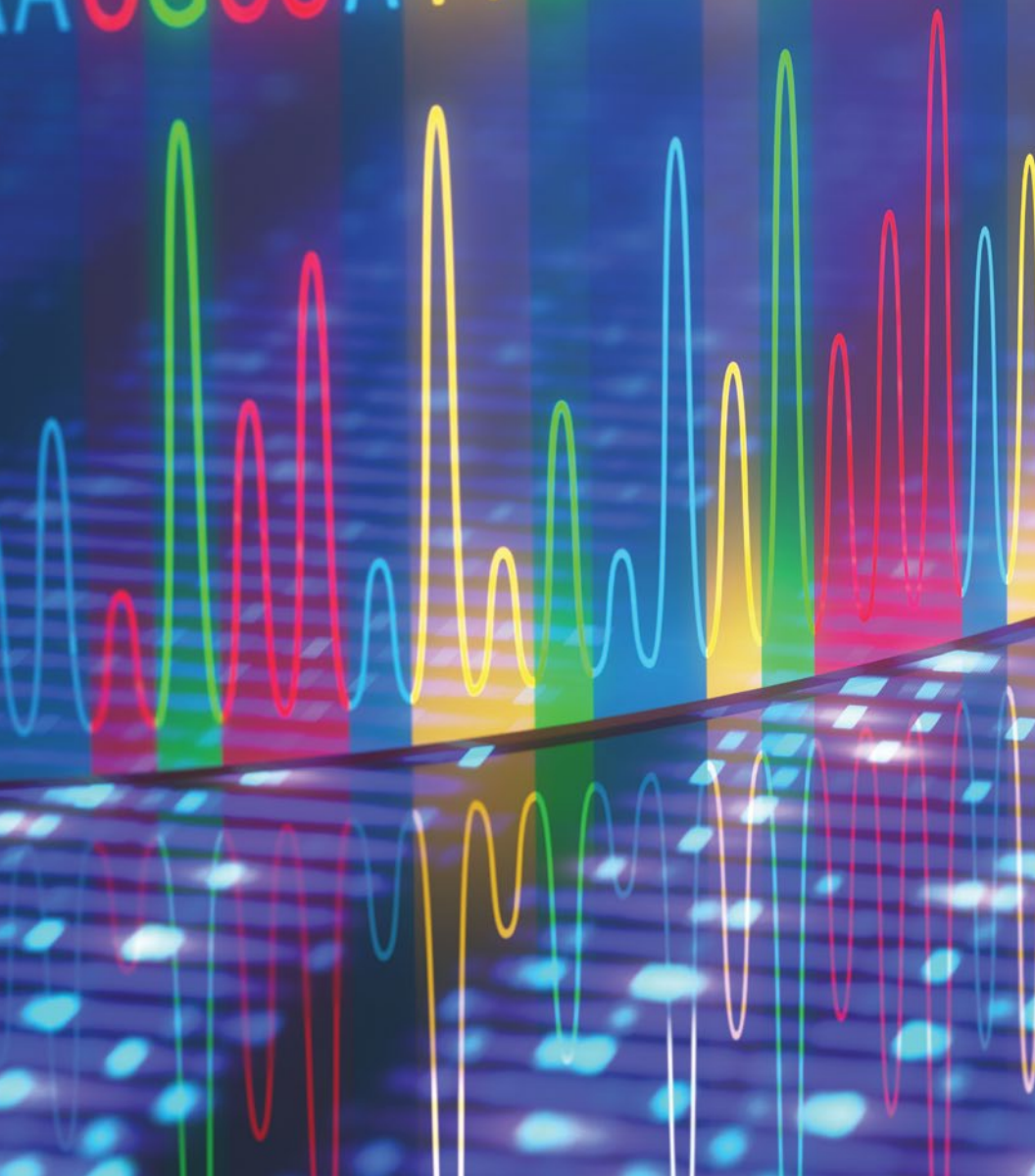
Bonne lecture!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marie-Kym Brisson', with a long, sweeping underline.

Marie-Kym Brisson

Vice-présidente, Développement stratégique
et affaires publiques
Génome Québec

Ä CGCCA TTGAA TGCCÄ



Problématique de la recherche

La science transforme notre quotidien, notamment par le biais des avancées technologiques qu'elle permet, mais aussi par le biais des débats socioscientifiques qu'elle suscite. Par exemple, l'une des réalisations scientifiques ayant eu le plus d'impact au cours des vingt dernières années sur le monde scientifique, ainsi que sur le public, est le projet international ENCODE (*Encyclopedia of DNA Elements*), dont le but est de décrypter tous les éléments codants du génome humain. Ce projet, qui a débuté en 2003, se poursuit encore aujourd'hui, poussant toujours plus loin nos connaissances en génétique humaine. Cet exploit a ouvert la porte à de nombreuses percées scientifiques importantes, telles que la génomique (une nouvelle discipline scientifique qui étudie la structure, l'organisation et le fonctionnement du génome d'un organisme ou d'une de ses parties), les organismes génétiquement modifiés (OGM), le clonage et la médecine personnalisée, toutes basées sur une connaissance accrue du génome humain et des particularités moléculaires des individus (Stern et Kampourakis, 2017).

Si la génétique et la génomique sont des sciences relativement jeunes – la première ne s'est réellement développée qu'à partir du milieu du XX^e siècle avec la découverte de la structure en double hélice de l'ADN –, elles progressent depuis à un rythme fulgurant, suscitant de nombreux espoirs, mais aussi soulevant de nouvelles problématiques sociales qui n'auraient été que spéculations il y a quelques décennies à peine. Ces avancées posent également l'importante question

de l'enseignement de ces disciplines au sein de la formation générale des jeunes, en particulier des adolescents du secondaire.

À la suite du projet ENCODE et de la découverte de l'identité moléculaire de l'être humain, d'autres technologies spectaculaires ont attiré l'attention du public en raison de leur caractère révolutionnaire. Le fameux ciseau moléculaire CRISPR-Cas9 a fait l'objet de nombreux articles et commentaires dans les médias à travers le monde, tant par son extrême précision à modifier les composantes du bagage génétique, que par les débats moraux, éthiques, socioscientifiques et politiques qu'il a suscités. Au cours de la dernière décennie, on a également assisté à la démocratisation – pour le meilleur et pour le pire – de la génomique appliquée à l'individu en mettant à la disposition des particuliers des kits d'analyse de leur ADN, grâce à des entreprises telles que 23andMe et Ancestry. De nouvelles spécialisations scientifiques et techniques, comme l'épigénomique (l'étude de l'effet de l'environnement sur le génome) et la métagénomique (l'étude de génomes provenant d'échantillons environnementaux) ont également vu le jour.

À l'instar du ciseau moléculaire, le développement de la génomique, approche particulièrement utile dans le contexte de la médecine préventive personnalisée, a été à l'origine de questions éthiques importantes, notamment en ce qui concerne le droit à la vie privée des individus et des patients. Comme le génome d'une personne brosse à la fois un portrait de son héritage ancestral et donne un aperçu de son état de santé actuel et futur, de nouvelles préoccupations relatives à la protection et la divulgation de ces informations sensibles ont émergé au sein de la société (Okan *et al.*, 2019).

En outre, les débats concernant les OGM, déjà exacerbés depuis de nombreuses décennies du fait des craintes exprimées par un segment important de la population, ont pris de l'ampleur maintenant qu'existe la possibilité d'appliquer cette

technologie à l'être humain. Rappelons le tollé suscité par l'annonce de la naissance, en novembre 2018, des premiers bébés humains dont les gènes avaient été modifiés, grâce à la technologie CRISPR-Cas9, par le biophysicien chinois He Jiankui, qui a depuis été emprisonné (Cyranoski, 2020).

En raison des nombreuses avancées scientifiques et technologiques révolutionnaires de ces dernières années, plusieurs chercheuses et chercheurs ont souligné l'importance de permettre à la population en général, et aux élèves du secondaire en particulier, de disposer d'un niveau de *littératie scientifique* suffisant pour prendre des décisions raisonnables et informées, non seulement pour eux-mêmes, mais aussi pour leur santé, leur famille et l'ensemble de la communauté, sans oublier le milieu naturel et l'environnement (Chapman *et al.*, 2017).

Qu'entend-on, au juste, par littératie scientifique ? Selon le National Research Council (NRC) étasunien, une bonne littératie scientifique (ou culture scientifique et technique, voir Godin, Gingras et Bourneuf, 1998) permet à une personne de trouver des réponses aux questions qu'elle se pose en lien avec ses interactions et expériences quotidiennes avec le monde naturel et technique. Cela signifie que cette personne a la capacité de décrire, expliquer et prédire des phénomènes scientifiques ou technologiques. La littératie scientifique implique également d'être en mesure de comprendre des articles sur la science et la technologie parus dans la presse populaire et de poser un jugement critique et éclairé sur la validité de leurs conclusions. La littératie scientifique permet en outre à toute personne d'identifier des questions socioscientifiques qui ont un impact sur sa vie, sa santé, sa qualité de vie, etc., et d'exprimer des opinions qui sont scientifiquement et technologiquement fondées. La littératie scientifique permet enfin d'évaluer la qualité de l'information scientifique et technologique et celle des preuves

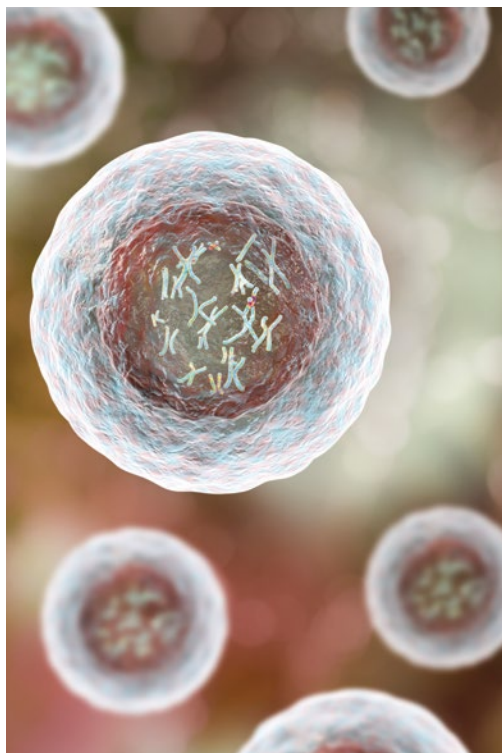
sur lesquelles sont basés les divers arguments qui sont avancés dans les débats socioscientifiques (NRC, 1996).

Le développement d'une bonne littératie scientifique, particulièrement en génétique et en génomique, est d'autant plus nécessaire dans nos sociétés développées que de nombreux sondages montrent un important manque de connaissances dans la population générale concernant les enjeux liés à ces disciplines. Selon Lanie *et al.* (2004), le concept de « gène » est particulièrement flou pour une bonne partie de la population, de même que tous les processus qui l'impliquent. Les répondants à divers sondages menés sur ces questions semblent également souscrire à une vision plutôt déterministe de la génétique (c.-à-d. croire que le destin d'un individu serait entièrement déterminé par ses gènes), ce qui n'est pas sans conséquence, puisqu'il a été démontré qu'une telle vision peut sous-tendre l'existence d'idéologies racistes, sexistes et homophobes au sein d'une frange importante de la population (Donovan, 2015; 2016; Donovan *et al.*, 2019a; 2019b).

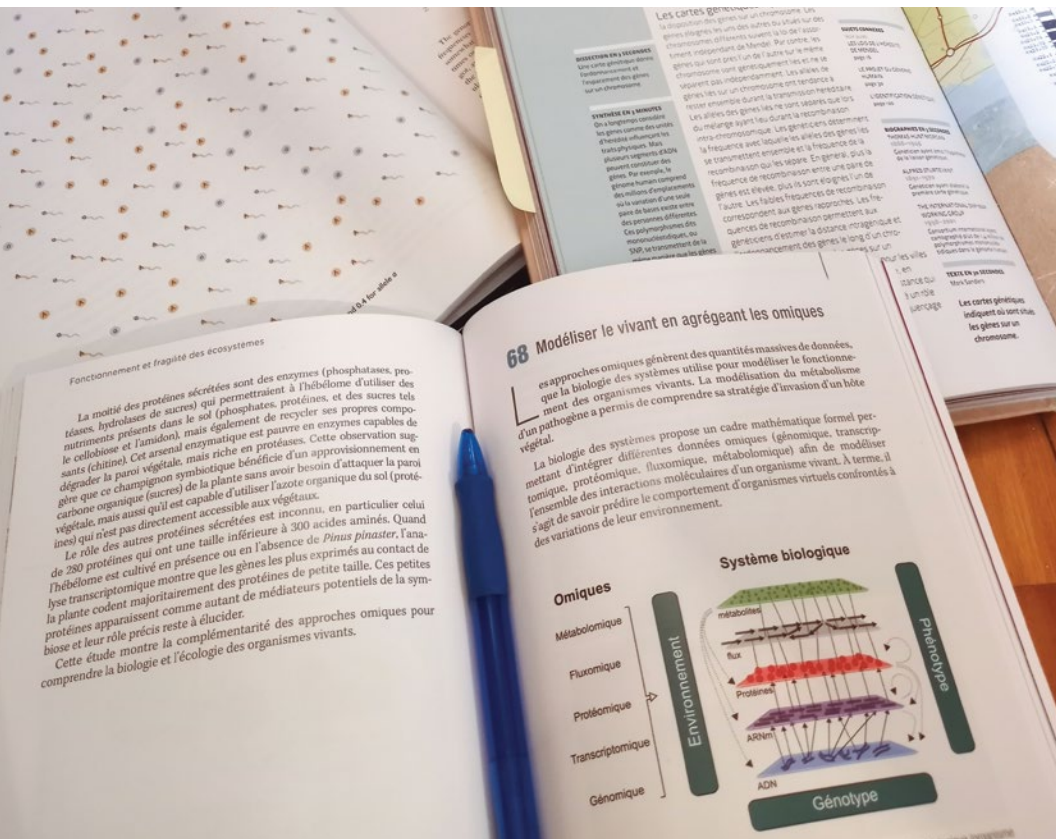
Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce manque de connaissance et des fausses conceptions qui en découlent, incluant le rôle des médias et de la culture populaire, mais il s'avère que l'école a également une part de responsabilité dans cette situation. Dans la plupart des programmes scolaires nord-américains, y compris le Programme de formation de l'école québécoise (PFEQ), la génétique est enseignée à des élèves du secondaire (âgés de 12 à 18 ans) sous la forme de trois modèles conceptuels distincts, généralement présentés l'un après l'autre, mais pas toujours dans le même ordre ni avec des liens explicites entre eux : il s'agit du modèle mendélien (étude de l'hérédité), du modèle méiotique (étude de la transmission de caractères par l'intermédiaire de la reproduction) et du modèle moléculaire (étude de l'ADN, ARN, protéines, bases azotées,

etc.) (Freidenreich *et al.*, 2011). Malgré ce qui a toutes les apparences d'un enseignement riche et diversifié, les élèves ressortent de leurs cours de biologie la plupart du temps confus, en particulier en ce qui concerne la façon dont ces trois modèles s'emboîtent et s'articulent, ce qui peut mener à l'élaboration de conceptions erronées à propos, par exemple, de l'emplacement des gènes, du rôle des chromosomes et de la transmission des caractères acquis, etc. (Freidenreich *et al.*, 2011). Cette confusion est malheureusement à l'origine du déterminisme et du réductionnisme génétiques (c.-à-d. croire que tout s'explique par la génétique), conceptions qui prévalent au sein de la population et des étudiants.

Il faut toutefois reconnaître que les notions de génétique sont hautement complexes, et donc difficiles à enseigner et à apprendre (Lewis et Wood-Robinson, 2000). Cette complexité vient du fait que les phénomènes génétiques sont le fruit de l'interaction de multiples entités situées à différents niveaux d'organisation (gènes, protéines, cellules, tissus, organes, etc.) et qui contiennent elles-mêmes une myriade d'éléments hétérogènes (Duncan et Reiser, 2007 ; Knippels, 2002). Ces différentes entités sont organisées de manière hiérarchique, de sorte que les éléments d'un niveau se



regroupent pour devenir les composantes des niveaux supérieurs. Les manifestations perceptibles de la génétique (par exemple, les traits physiques) émergent ainsi d'interactions se produisant à des niveaux microscopiques (par exemple, entre les protéines d'une cellule ou entre les cellules d'un tissu) qui ne nous sont pas directement accessibles. Les phénomènes génétiques se caractérisent également par le fait que la structure hiérarchique est en réalité composée d'éléments ontologiquement distincts, mais en interaction constante, à savoir une couche d'information (les gènes) et une couche biophysique (les protéines, les cellules, les tissus, les organes, etc.). En effet, ce sont les gènes et l'information qu'ils contiennent qui déterminent la production des protéines (leur forme, leur rôle, etc.) dont dépendent ensuite tous les autres mécanismes génétiques, dont les traits individuels.



Fonctionnement et fragilité des écosystèmes

La moitié des protéines sécrétées sont des enzymes (phosphatases, protéases, hydrolases de sucres) qui permettraient à l'hébérome d'utiliser des tétrases, hydrolyses de sucres) (phosphatases, protéines, et des sucres tel que le collébiose et l'amidon), mais également de recycler ses propres composants (chitine). Cet arsenal enzymatique est pauvre en enzymes capables de dégrader la paroi végétale, mais riche en protéases. Cette observation suggère que ce champignon symbiotique bénéficie d'un approvisionnement en carbone organique (sucres) de la plante sans avoir besoin d'attaquer la paroi végétale, mais aussi qu'il est capable d'utiliser l'azote organique du sol (protéogène qui n'est pas directement accessible aux végétaux).

Le rôle des autres protéines sécrétées est inconnu, en particulier celui des 280 protéines qui ont une taille inférieure à 300 acides aminés. Quand l'hébérome est cultivé en présence ou en l'absence de *Pinus pinaster*, l'analyse transcriptomique montre que les gènes les plus exprimés au contact de la plante codent majoritairement des protéines de petite taille. Ces petites protéines apparaissent comme autant de médiateurs potentiels de la symbiose et leur rôle précis reste à élucider.

Cette étude montre la complémentarité des approches omiques pour comprendre la biologie et l'écologie des organismes vivants.

Les cartes génomiques
La disposition des gènes sur un chromosome. Les gènes situés sur les bras des chromosomes sont les plus accessibles à la recombinaison indépendante de Mendel. Par contre, les gènes qui sont près l'un de l'autre sur le même chromosome sont généralement liés et ne se recombinent pas indépendamment. Les gènes de ce type ont une tendance à se transmettre ensemble pendant la méiose.

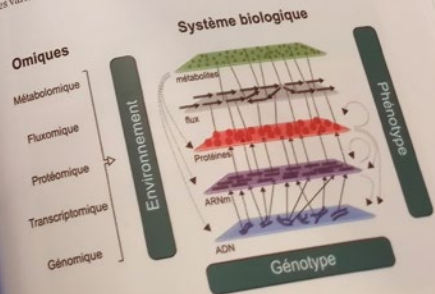
RECOMBINAISON DES GÈNES
Une unité génétique donne lieu à un chromosome. Les gènes situés sur un chromosome sont généralement liés et ne se recombinent pas indépendamment. Les gènes de ce type ont une tendance à se transmettre ensemble pendant la méiose.

RECOMBINAISON DES GÈNES
Une unité génétique donne lieu à un chromosome. Les gènes situés sur un chromosome sont généralement liés et ne se recombinent pas indépendamment. Les gènes de ce type ont une tendance à se transmettre ensemble pendant la méiose.

68 Modéliser le vivant en agrégeant les omiques

Les approches omiques génèrent des quantités massives de données, que la biologie des systèmes utilise pour modéliser le fonctionnement des organismes vivants. La modélisation, du métabolisme d'un pathogène a permis de comprendre sa stratégie d'invasion d'un hôte végétal.

La biologie des systèmes propose un cadre mathématique formel permettant d'intégrer différentes données omiques (génomique, transcriptomique, protéomique, fluxomique, métabolomique) afin de modéliser l'ensemble des interactions moléculaires d'un organisme vivant. À terme, il s'agit de savoir prédire le comportement d'organismes virtuels confrontés à des variations de leur environnement.



Les élèves sont malheureusement mal préparés à aborder la génétique dans toute sa complexité, d'autant plus que les pratiques pédagogiques actuelles dans ce domaine ont tendance à se concentrer sur la mémorisation des termes et des processus, plutôt que sur la compréhension des concepts de base et des mécanismes de la génétique (Duncan et Reiser, 2007 ; Kurth et Roseman, 2001). De plus, les programmes et les manuels scolaires accusent souvent un retard important par rapport aux découvertes en génie génétique et dans la science des gènes, et ignorent fréquemment les usages fondamentaux des biotechnologies en médecine ou en agriculture, par exemple (Stern et Kampourakis, 2017). Kurth et Roseman (2001) et Duncan et Tseng (2011) déplorent également que l'ordre de présentation des contenus de la formation en génétique, tel qu'il apparaît dans la plupart des manuels scolaires au secondaire, ne corresponde ni aux parcours d'apprentissage optimaux observés chez les élèves ni aux progressions des apprentissages (PdA, *Learning progression*) qui sont généralement proposées par les chercheuses et les chercheurs.

Les avancées récentes en sciences de l'éducation visant l'enseignement de concepts scientifiques à l'école, de la maternelle à la fin du secondaire, enjoignent aux enseignantes et enseignants de proposer aux élèves des activités scientifiques stimulantes qui favorisent leurs apprentissages, non seulement ceux des contenus à l'étude, mais aussi ceux de la démarche expérimentale et de la « méthode » scientifique. Par exemple, aux États-Unis, le document *A Framework for K-12 Science Education* préconise une approche qui inclut les expérimentations scientifiques en classe et qui élargit ces activités pour intégrer les pratiques d'ingénierie dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences (NRC, 2012). Les *Next Generation Science Standards* (NGSS) qui en sont issus



stipulent que l'apprentissage est multidimensionnel et que les élèves doivent s'engager activement dans leur apprentissage des sciences pour l'améliorer, et ce, en faisant de la recherche scientifique, en concevant des projets techniques et en appliquant des concepts scientifiques transversaux (NGSS Lead States, 2013). Pour atteindre ces objectifs, les enseignantes

et les enseignants doivent explorer et mettre en œuvre des pratiques pédagogiques efficaces qui offrent aux élèves la possibilité de développer une compréhension approfondie des contenus en sciences, en technologie et en ingénierie, ainsi que des méthodes qui leur sont propres.

Au Québec, l'étude de la génétique et de la génomique se concentre principalement sur les trois premières années de l'école secondaire (élèves âgés en moyenne de 12 à 15 ans). Dès le premier cycle du secondaire (1^{re} et 2^e années), des cours de sciences et de technologie généralistes abordent la structure de la cellule, la théorie de l'évolution et l'hérédité (génétique mendélienne et moléculaire). En 3^e secondaire, au début du parcours particulier menant aux programmes scientifiques du cégep et de l'université, les concepts de mitose et de méiose sont présentés, ainsi que celui de diversité génétique. Puisque le PFEQ définit le contenu à enseigner de manière assez large et que les enseignantes et les enseignants ont toute liberté d'adapter ces contenus à leurs leçons, il est difficile de porter un jugement éclairé sur la façon dont on inculque la génétique au Québec, d'autant plus qu'il n'existe pas d'étude systématique en ce sens. En cela, la situation québécoise ressemble probablement à celle qui prévaut dans la plupart des autres juridictions nord-américaines et partage sans doute avec elles les mêmes forces et les mêmes faiblesses.

C'est donc dans ce contexte général que nous avons entrepris la recension des écrits dont nous présentons ici les résultats. Notre focalisation sur l'enseignement de la génétique au secondaire se comprend par le fait qu'il s'agit d'une phase importante dans la formation générale des jeunes et que plusieurs d'entre eux ne poursuivront pas leurs études au-delà de la 5^e année du secondaire. Rappelons que, selon le recensement de 2016, plus de la moitié de la population québécoise ne détient pas de

diplôme postsecondaire (Institut de la statistique du Québec, 2016). Il s'agit donc, dans le cas de nombreux élèves, de la dernière occasion, pour les institutions d'enseignement formel, de leur faire bénéficier d'un apprentissage en génétique. Nous avons également choisi de nous concentrer sur la recherche en sciences de l'éducation menée au cours des dix dernières années en tenant compte du fait que l'évolution rapide des connaissances en génétique et en génomique a entraîné une accélération tout aussi forte des recherches concernant l'enseignement de ces matières. Enfin, notre recension s'est arrêtée aux articles faisant référence à des résultats empiriques et publiés dans les meilleures revues scientifiques internationales, afin d'assurer le plus haut niveau de qualité et de pertinence aux conclusions que nous tirerons de leur analyse. Nous espérons que la lectrice, le lecteur sera convaincu du bien-fondé de nos choix en lisant les résultats de notre synthèse présentés ci-après.

Présentation du rapport

Le présent rapport a été produit à la demande de Génome Québec et il répond à l'une des exigences de l'entente conclue en août 2019 entre Génome Québec et l'EREST, plus particulièrement entre Génome Québec et le Pr Pierre Chastenay, qui en est l'auteur principal. Il contient des informations sur la façon dont a été constitué le corpus d'articles scientifiques sur lequel est basée la présente recension, ainsi que sur la façon dont les données qui seront discutées dans les prochaines sections du présent rapport ont été produites et analysées.

Question de recherche

La question de recherche qui a guidé la présente étude s'énonce comme suit :

« Qu'est-ce que la recherche empirique en sciences de l'éducation menée à travers le monde de 2009 à 2019 nous apprend sur les retombées éducatives probantes de l'enseignement de concepts liés à la génétique dans les classes du secondaire ? »

Notons que, dans ce qui précède, nous retenons la définition que Rennie (2014) a proposée pour l'expression « retombées éducatives », à savoir tout changement cognitif, affectif, psychomoteur, social ou culturel découlant du sens que les

apprenants donnent à leurs expériences durant l'enseignement, tout en y apportant les précisions suivantes :

- Nous ne nous sommes intéressés qu'aux retombées éducatives de l'enseignement de concepts liés à la génétique sur les élèves du secondaire ;
- Nous avons défini l'apprentissage comme un changement dans le comportement d'un organisme résultant d'une interaction avec son environnement et se traduisant par un élargissement de son répertoire d'actions. L'apprentissage est aussi un ensemble de mécanismes menant à l'acquisition de savoir-faire, de savoir-être, de savoirs, de connaissances, de valeurs et d'attitudes. L'apprentissage se distingue également des changements comportementaux survenant à la suite de la maturation de l'organisme, qui constituent eux aussi des enrichissements du répertoire, mais sans qu'une expérience éducative ou une interaction avec un milieu éducatif y ait joué un rôle significatif.

Constitution du corpus

Nous avons mené notre recherche bibliographique à l'automne 2019 dans les bases de données Education Source et Education Resource Information Center (ERIC), les deux plus importantes dans le domaine des sciences de l'éducation, en utilisant l'algorithme de recherche suivant :

PRÉSENTATION DU RAPPORT

(geneti* OR genom* OR inheritance OR heredit* OR chromosom* OR DNA OR meiosis OR mitosis OR gene OR genes OR allele* OR phenotyp* OR genotyp* OR gamete* OR clone OR cloning OR GMO)
 AND
 (learning OR teaching OR instruction OR concept* OR misconcept* OR student*)
 NOT
 (postsecondary OR undergrad* OR higher education OR college OR university OR post-secondary OR post secondary)

Les critères de sélection ci-dessous ont ensuite été appliqués aux articles recueillis :

Critères d’admissibilité Pour être retenu, un article devait...	Critères d’exclusion Exemples
o Être écrit en anglais	o Corps du texte non disponible dans la langue ciblée
o Avoir été publié dans une revue de recherche de qualité où les textes sont évalués par les pairs	o Publication dans une revue professionnelle o Texte non évalué par les pairs o Article de mauvaise qualité o Publication dans une revue prédatrice
o Présenter les résultats d’une recherche empirique, incluant des études de cas (<i>case studies</i>)	o Recension et synthèse de plusieurs recherches o Texte à visée théorique uniquement o Absence de résultats basés sur l’analyse de données rigoureuses

ENSEIGNEMENT DE LA GÉNÉTIQUE AU SECONDAIRE

o Décrire une intervention éducative (pédagogique/ didactique)	o Présentation des résultats d'une étude sans intervention éducative
o Porter sur le thème de la génétique ou un thème connexe	o Concepts en biologie, mais non en génétique
o Porter sur des élèves inscrits au secondaire	<ul style="list-style-type: none"> o Élèves du préscolaire ou du primaire o Éducation postsecondaire (collège et université) o Formation des maîtres (initiale et continue) o Formation professionnelle o Formation des adultes
o Présenter des résultats portant sur les retombées éducatives de l'intervention sur les élèves	<ul style="list-style-type: none"> o Questions/objectifs de recherche ne concernant pas les élèves o Résultats ne mentionnant pas les élèves o Résultats ne mentionnant pas d'effets de l'intervention éducative

Notre recherche a abouti à la constitution d'un corpus préliminaire comportant 2278 articles. L'étude des résumés (*abstracts*) de ces articles et l'élimination des articles doublons et de ceux ne respectant pas nos critères d'admissibilité, tels que décrits dans le tableau ci-dessus, ont permis de réduire ce nombre à 227 articles. Par la suite, l'analyse détaillée du contenu de ces textes a entraîné l'exclusion de 122 articles qui ne répondaient pas à nos critères, ce qui a formé un corpus final de 105 articles. Puis, en cours d'examen, quelques textes qui

avaient été retenus nous sont apparus non-pertinents ou de mauvaise qualité et ont aussi été éliminés. De plus, étant donné que notre recherche a dû être interrompue durant plusieurs mois en raison de la pandémie de COVID-19, nous avons relancé l'algorithme au printemps 2021 afin de détecter des articles pertinents parus entre la fin de notre recension originale de l'automne 2019 et le début de l'année 2020. Cet exercice a mené à l'identification de 16 nouveaux articles dont 5 ont été inclus dans la présente étude. Enfin, une revue des références bibliographiques citées dans les principaux articles recensés a permis de repérer quelques articles supplémentaires ; il s'agissait le plus souvent d'analyses de données secondaires issues de recherches déjà présentes dans notre corpus. Le corpus final sur lequel s'appuie la présente recension des écrits contient donc 97 articles au total. La liste de ces articles apparaît à la toute fin de ce rapport dans la section « Liste des articles recensés ».

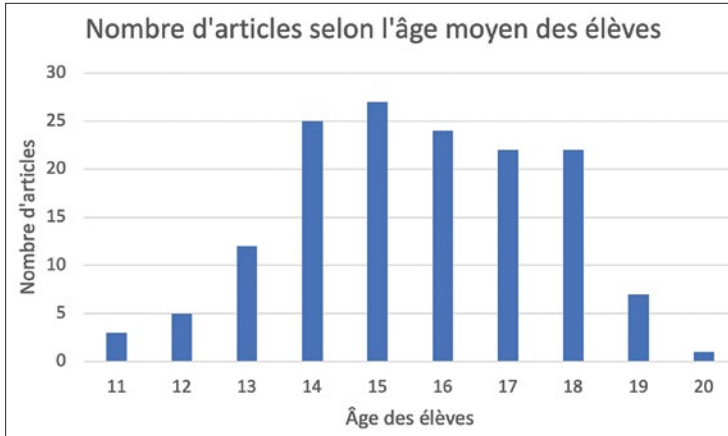
Description du corpus

La série de graphiques ci-dessous vise à donner un aperçu synthétique du contenu du corpus constitué en utilisant la méthode décrite précédemment.

Nombre d'articles selon l'âge moyen des élèves

Le nombre total de participants aux études recensées dans le présent rapport s'élève à plus de 30 000. Il s'agit d'élèves du secondaire, âgés de 11 à 20 ans (âge moyen de 15,6 ans, correspondant à celui des élèves du secondaire 4 au Québec). Puisque peu d'études présentaient en détail la répartition des élèves par tranche d'âge ou par niveau scolaire, il ne nous est pas possible

de tracer un graphique du nombre d'élèves ayant participé aux études par groupe d'âge ni par niveau scolaire.



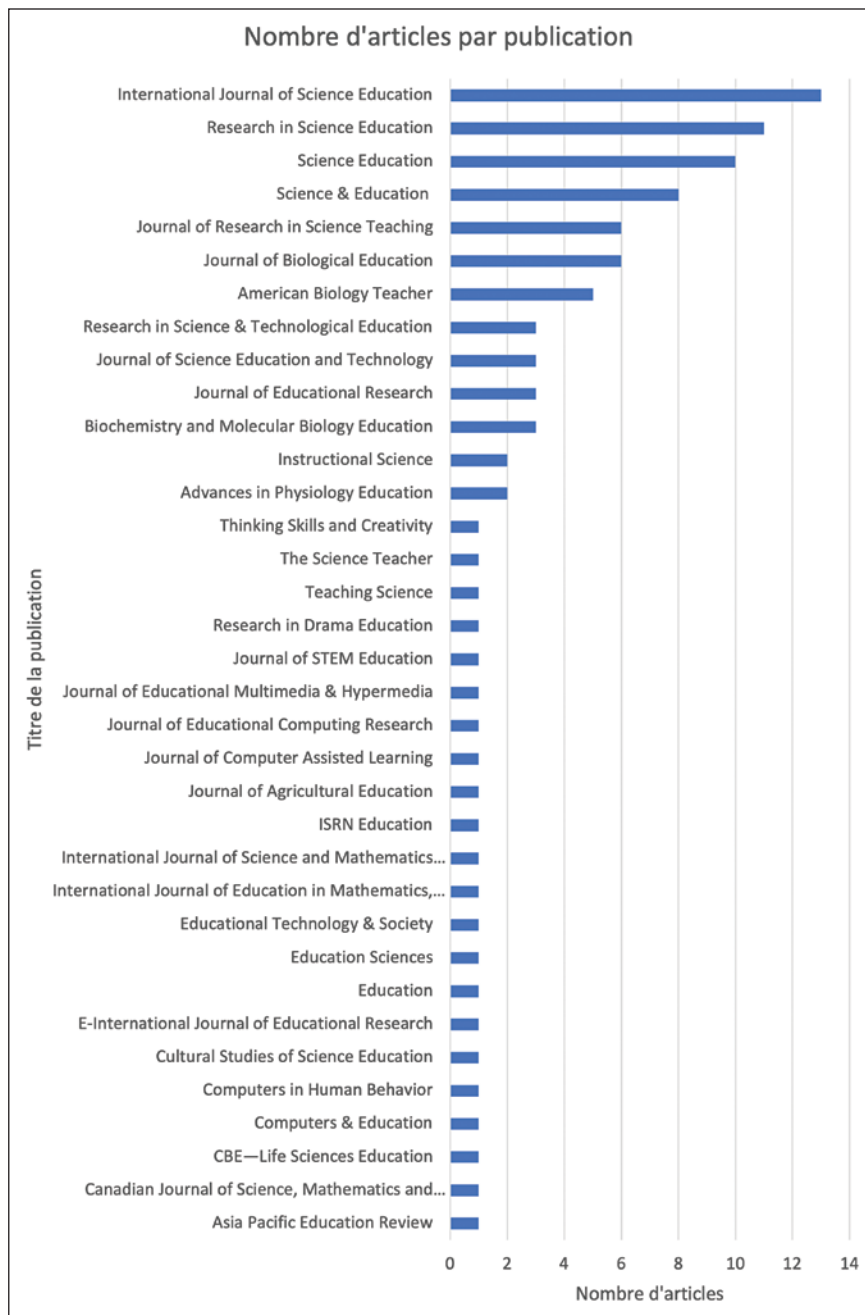
Nombre d'articles par année de publication

En ce qui concerne l'année de publication, on voit un premier pic apparaître en 2011 et un second, moins important, en 2019, mais les variations annuelles demeurent faibles. Les deux articles parus en 2020 ont d'abord été publiés en ligne en 2019, ce qui explique leur présence dans notre corpus, qui se limite à la période 2009-2019.



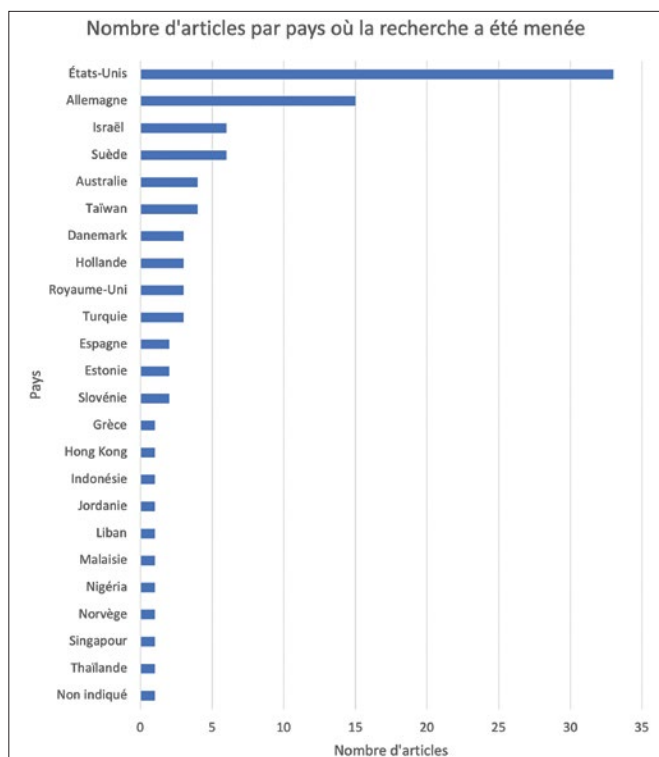
Nombre d'articles par publication

Le graphique de la page suivante présente les revues et journaux scientifiques dans lesquels les articles recensés ont été publiés. On constate que les cinq plus importantes publications – *International Journal of Science Education*, *Research in Science Education*, *Science Education*, *Science & Education* et *Journal of Research in Science Teaching* – contiennent à eux seuls la moitié des articles recensés. *Journal of Biological Education* et *American Biology Teacher* regroupent onze articles, tandis que les journaux restants en comptent un à trois chacun.



Nombre d'articles par pays où la recherche a été menée

On ne sera pas surpris du fait que la grande majorité de la recherche en enseignement de la génétique au secondaire a été menée aux États-Unis (33 articles, un peu plus du tiers de tous les articles recensés). L'Allemagne suit avec 15 articles; ce nombre élevé s'explique par la grande activité d'une équipe de recherche bavaroise dirigée par Franz-Josef Scharfenberg et Franz X. Bogner et travaillant au *Gene-Technology Demonstration Laboratory* de l'Université de Bayreuth, qui accueille des élèves du secondaire pour leur faire faire des activités de type « mains-à-la-pâte » (*hands-on*) dans un laboratoire de génétique. Aucune des études que nous avons recensées n'a été effectuée au Canada.

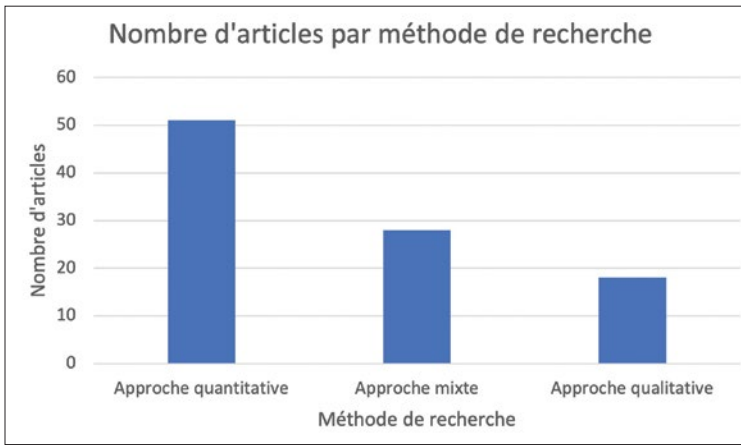


Nombre d'articles par méthode de recherche

En ce qui concerne les méthodes de collecte des données employées dans les recherches empiriques que nous avons recensées, une majorité d'études ont utilisé des approches quantitatives, recueillant les réponses à leurs questions de recherche à l'aide de questionnaires pré- et post-intervention (questions de type « vrai ou faux », questions à choix multiples ou questions ouvertes).

Du point de vue qualitatif, on remarque aussi le grand nombre d'entretiens semi-dirigés qui ont été réalisés (avec des élèves seuls ou en groupe). Dans plusieurs cas, les chercheuses et les chercheurs ont observé et enregistré ou filmé des débats entre élèves ou des activités en classe dirigées par les enseignantes et les enseignants pour en faire, par la suite, l'analyse. Dans quelques cas, les chercheuses et les chercheurs ont procédé à la collecte d'artéfacts fabriqués par les élèves au cours des activités éducatives ainsi que des productions écrites des élèves (rapports de laboratoire, fiches d'activité, dessins, etc.). Lorsque les activités éducatives nécessitaient l'utilisation d'un ordinateur, des données sur la navigation des élèves (nombre de clics, menus consultés, etc.) ont été recueillies, de même que le suivi oculaire sur l'écran. Au moins une étude a utilisé un système de réponse basé sur des cliquoirs (*clickers*).

Dans plusieurs études, lorsque les chercheuses et les chercheurs ont procédé à la collecte de nombreuses données de sources différentes (par exemple, des questionnaires, des artéfacts, des entrevues, etc.), ces données ont été triangulées et ont été analysées selon une approche mixte.



Principaux constats (sommaire exécutif)

Description des principales interventions éducatives répertoriées

- Plusieurs interventions se sont déroulées sur des durées moyennes à longues (souvent plus d'une semaine) en proposant aux élèves des activités au cours desquelles la théorie et la pratique se succèdent alternativement, afin de mieux leur faire apprendre les concepts en génétique;
- Plusieurs interventions ont eu lieu en laboratoire, dans le cadre d'une approche de type « mains-à-la-pâte » (*hands-on*), parfois dans un laboratoire de l'école, parfois dans un laboratoire externe, professionnel ou universitaire (par exemple, quand les élèves se déplacent pour faire de l'amplification en chaîne par polymérase ou une électrophorèse dans un laboratoire universitaire);
- Plusieurs interventions se sont servies de supports visuels (images 2D ou 3D, images fixes ou animations vidéo,

environnements virtuels, modèles 3D concrets, etc.) permettant de mieux représenter des éléments trop petits pour être perçus à l'œil nu, comme la structure de l'ADN et des protéines, divers modèles moléculaires, des processus (par exemple, la méiose et la mitose), etc.;

- Plusieurs interventions ont impliqué l'utilisation d'un logiciel ou d'un laboratoire virtuel multimédia, comme BioLogica™ (et sa suite *Teaching Genetics with Dragons*), WISE, etc.;
- Quelques interventions ont utilisé l'approche par résolution de problèmes (par exemple, des situations médicales dans lesquelles il faut trouver des mutations génétiques à l'origine d'une maladie génétique, ou encore une approche de type *Crime Scene Investigation*, ou CSI);
- Quelques interventions se sont appuyées sur des activités visant le développement, chez les élèves, d'une opinion complexe et nuancée à propos de questions socio-scientifiques (QSS) liées à la génétique (par exemple, les biotechnologies, les OGM, etc.), et ce, par l'intermédiaire de pièces de théâtre, de débats ou de discussions en classe;
- Quelques interventions se sont basées sur les théories du changement conceptuel (par exemple, provoquer un conflit cognitif, faire lire des textes de réfutation) pour favoriser l'apprentissage des élèves;
- Quelques interventions ont comparé l'utilisation en classe de deux programmes scolaires distincts (*curriculums*) ou de deux manuels ou ensembles didactiques scolaires différents;
- Quelques interventions ont cherché à déterminer de quelle manière ordonnancer la présentation des concepts en génétique (à l'intérieur d'une même séquence

d'enseignement ou d'un niveau scolaire à l'autre) afin d'obtenir la meilleure progression des apprentissages (PdA, *Learning progression*) possible chez les élèves.

Principaux résultats de la recherche

- Il est essentiel de prendre en compte les idées premières des élèves concernant les concepts en génétique, de les rendre explicites au sein de la classe et de s'en servir comme point de départ du processus d'enseignement-apprentissage afin de faire évoluer les conceptions des élèves vers des concepts scientifiques;
- Le vocabulaire très technique utilisé en génétique peut constituer un obstacle de taille pour les élèves; ces termes techniques doivent donc faire l'objet d'une attention particulière, de définitions claires et d'exemples concrets qui permettent aux apprenants de se souvenir de leur signification et de les employer à bon escient pour communiquer leurs idées et hypothèses à propos des concepts qui y sont rattachés;
- Il est important d'établir des liens clairs et fonctionnels entre les divers niveaux d'organisation des entités, des systèmes et des modèles en génétique (molécule-cellule-organisme-population) et de faire en sorte que les élèves développent une certaine aisance à naviguer entre ces différents niveaux de complexité en fonction des problèmes à résoudre ou des processus à expliquer;
- Les images statiques 2D et 3D, les modèles concrets (maquettes), les animations vidéo, les simulations numériques, les plateformes informatiques, les logiciels, les jeux sérieux et autres didacticiels en génétique permettent aux élèves d'avoir accès à des représentations réalistes d'entités et

de processus dynamiques autrement invisibles à l'œil nu (particulièrement aux niveaux cellulaire et moléculaire). De plus, ces outils rendent ces entités et processus manipulables par les élèves. Mais leur élaboration doit impliquer une réflexion approfondie quant aux objectifs éducatifs qu'ils poursuivent, être accompagnée de scénarios didactiques éprouvés et faire l'objet d'une évaluation objective. Quoi qu'il en soit, il faut éviter que ces outils deviennent des obstacles à l'apprentissage en créant des conceptions alternatives dans l'esprit des élèves;

- Il existe, dans les écrits recensés, deux visions plus ou moins complémentaires de ce que devrait être la progression idéale des apprentissages pour amener les élèves à une compréhension optimale des entités et processus en jeu dans les modèles génétiques. Les résultats actuels semblent pencher en faveur de l'explication du modèle moléculaire (ADN, gènes et protéines) en premier lieu afin de s'en servir comme assise pour ensuite présenter les modèles cellulaires et ceux de la reproduction (méiose et mitose), de même que les mécanismes de transmission des traits (génétique mendélienne) et d'évolution des espèces par sélection naturelle. D'autre part, certains résultats empiriques semblent démontrer que l'approche consistant à exposer les divers niveaux d'organisation génétique en parallèle pourrait grandement aider les élèves à faire des liens entre ces niveaux. Ces recherches pourraient fortement inspirer les programmes scolaires et autres documents ministériels, comme la Progression des apprentissages (ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011), qui spécifient généralement l'ordre de présentation des concepts devant être étudiés au secondaire;

- Les recherches rapportent de nombreuses interventions bénéfiques, en particulier celles qui impliquent des activités de type « mains-à-la-pâte » (dans des laboratoires réels ou virtuels) ou l'utilisation de modèles 3D (réels ou virtuels);
- L'apprentissage des élèves dans le cadre d'une expérience en laboratoire de génétique est favorisé lorsqu'une certaine liberté de choix leur est laissée quant au développement et à la mise en place d'un protocole expérimental, mais cette liberté doit être bien étayée et encadrée par de l'aide ciblée, soit par le biais de facilitateurs humains, de logiciels d'aide à la décision ou d'autres outils semblables;
- La contextualisation des apprentissages dans des situations réelles ou proches du vécu des élèves semble favoriser leur apprentissage des concepts en génétique;
- Le développement chez les élèves d'aptitudes de pensée de haut niveau, comme la logique hypothético-déductive et la métacognition, semble aider à la compréhension des différents modèles génétiques souvent présentés en classe de secondaire;
- De multiples études rapportent que de nombreux élèves ont du mal à comprendre le rôle central joué par les protéines dans les processus génétiques, même après une intervention éducative ciblée. Le rôle des protéines en tant que vecteurs des caractéristiques phénoménologiques des individus, caractéristiques basées sur l'information génétique contenue dans les gènes et l'ADN, devrait faire l'objet de plus d'attention de la part des concepteurs de programmes scolaires, de séquences et d'outils éducatifs;
- Les élèves ont souvent des opinions initiales négatives par rapport aux biotechnologies (OGM, manipulations

génétiques, clonage, etc.), surtout lorsque ces dernières sont utilisées sur des humains ou des animaux ;

- De façon générale, la création d'un conflit cognitif chez les élèves semble favoriser leurs apprentissages, mais quelques conceptions alternatives bien ancrées y résistent ;
- Les attitudes des élèves (motivation, intérêt, etc.) envers la génétique sont souvent améliorées par des activités éducatives qui impliquent, au cours de leur apprentissage, une participation active de leur part ;
- L'essentialisme génétique, c.-à-d. la croyance que tout, dans le développement et le devenir d'un individu, est déterminé par ses gènes et qu'il existe des différences génétiques fondamentales entre les groupes humains (par exemple, entre les Afro-Américains et les Caucasiens) au niveau de l'intelligence, du comportement, etc., peut être amplifié par des interventions éducatives qui mettent en exergue des différences génétiques entre les « races » humaines (par exemple, celles insistant sur des maladies génétiques qui sont prédominantes chez un groupe d'individus, mais pas chez un autre). De telles interventions sont donc à éviter. On a aussi montré que des conceptions essentialistes en génétique sont à l'origine ou renforcent les stéréotypes racistes, homophobes, etc.

Principales recommandations issues des articles recensés

- Utiliser davantage d'illustrations et de modélisations 3D pour l'enseignement de concepts en génétique ;
- Les plateformes informatiques constituent une bonne alternative lorsqu'on ne peut pas faire d'expérience ou d'exercice en laboratoire de génétique ;

- Le niveau d'étayage (*scaffolding*) offert aux élèves est un paramètre important et sensible dont dépend énormément le succès de toute entreprise d'enseignement. Trop peu d'étayage et la tâche devient trop difficile pour les élèves pour qu'il y ait véritablement apprentissage; trop d'étayage et la tâche devient trop facile et ne mène pas aux apprentissages visés. Il est donc important que les enseignantes et les enseignants soient formés à bien accompagner leurs élèves dans leurs apprentissages;
- Les programmes scolaires (*curriculums*) et les manuels scolaires sont généralement en retard par rapport aux progrès en génétique découlant de la recherche et n'abordent pas suffisamment les questions socioscientifiques en lien avec les technologies génétiques, ou alors le font de manière superficielle et simpliste;
- Il est particulièrement difficile pour les élèves du secondaire de comprendre la différence entre un allèle et un gène, et comment ces concepts s'imbriquent dans ceux d'ADN et de protéines;
- L'ordre dans lequel sont présentés les concepts en génétique moléculaire et en génétique mendélienne devrait recevoir plus d'attention de la part des enseignantes et des enseignants. En effet, on enseigne souvent la génétique mendélienne en premier, alors que celle-ci serait mieux comprise par les élèves si elle était expliquée en même temps ou après la présentation de la génétique moléculaire, puisque c'est sur cette dernière qu'elle s'appuie;
- Il existe très peu d'études longitudinales (études qui s'étendent sur plusieurs années) à propos de l'évolution des apprentissages des élèves en génétique; pourtant, celles-ci aideraient à mieux comprendre comment les jeunes apprennent la génétique durant leur parcours au

secondaire (et même au primaire) et nous informeraient sur la progression idéale des apprentissages ;

- Il est important de parler aux élèves d'épistémologie, de l'histoire des sciences et de la nature de l'activité scientifique et des savoirs scientifiques, afin de mieux contextualiser leurs apprentissages et de les aider à comprendre « comment on sait ce que l'on sait » en sciences ;
- Les enseignantes et les enseignants devraient favoriser les approches de type « mains-à-la-pâte » et les expériences scientifiques authentiques (en classe, ou dans des laboratoires virtuels, professionnels ou universitaires) tout en accordant d'avantage d'importance aux activités qui précèdent et suivent les séances en laboratoire (phases de préparation, interprétation des résultats, etc.) ;
- Les enseignantes et les enseignants devraient être formés à proposer des activités éducatives en génétique centrées sur les élèves, leurs intérêts, leurs questionnements, leur propre vécu, etc. ;
- L'approche de l'enseignement de la génétique basée sur les sciences citoyennes est prometteuse (par exemple, Mission ADN-eau de Génome Québec), mais n'a pas encore fait l'objet d'une véritable évaluation rigoureuse de ses retombées éducatives auprès des élèves du secondaire ;
- Les interactions entre les élèves au sein de groupes ou d'équipes lorsque des questions socioscientifiques liées à la génétique sont abordées devraient être encouragées et l'enseignante ou l'enseignant devrait s'assurer de créer un climat démocratique en classe pour que les élèves sentent qu'il existe un réel dialogue et qu'ils soient à l'aise de poser des questions et de donner leur opinion librement ;
- En classe, avant l'organisation de débats au sujet de questions socioscientifiques controversées en génétique, une

formation approfondie des élèves (et des enseignantes et des enseignants) à propos des meilleures pratiques d'argumentation à utiliser dans un tel contexte, ainsi qu'une formation concernant la différence entre faits scientifiques et avis personnels, devrait être suivie ;

- Les concepteurs des programmes scolaires et des ensembles didactiques (manuels, cahiers d'exercices), de même que les enseignantes et enseignants, devraient porter une attention particulière à toute information qui pourrait être susceptible de créer ou de renforcer les conceptions essentialistes en génétique, en particulier en ce qui a trait aux « races » humaines et aux différences génétiques entre divers groupes humains (par exemple entre les Afro-Américains, les Caucasiens, les Asiatiques, etc.).

Limites de la recherche

Malgré notre désir d'être le plus rigoureux possible dans notre recension, nous ne pouvons prétendre à une parfaite exhaustivité, puisqu'il est toujours possible que des articles soient passés entre les mailles de notre filet et nous aient échappé. D'autre part, la méthode de recension que nous avons retenue et les outils que nous avons utilisés, de même que quelques-uns de nos critères de sélection, sont à l'origine d'un certain nombre de biais et de limites que nous détaillons ci-dessous :

- Nous nous sommes limités aux textes parus en anglais. Malgré le fait que la majorité de la recherche en sciences de l'éducation est publiée en anglais, notre choix de ne pas nous pencher sur les écrits scientifiques publiés dans d'autres langues nous prive d'une partie de la réflexion concernant l'enseignement de la génétique au niveau

secondaire. Par exemple, il existe une longue tradition de recherche en didactique de la biologie en France, pays de Pasteur, à laquelle notre recension n'a pas eu accès, ou si peu. On pourrait faire le même constat avec des articles scientifiques publiés en espagnol ou en mandarin.

- Nous nous sommes limités à la recherche menée auprès d'élèves du secondaire. Étant donné que les systèmes scolaires diffèrent parfois grandement d'un pays ou d'une région à l'autre, il n'est pas toujours facile d'établir des parallèles clairs entre les années d'étude regroupées au sein de l'éducation secondaire. En règle générale, nous n'avons pris en compte que les études portant sur des élèves âgés de 12 à 18 ans environ. Quelques études, que nous avons mises de côté, s'intéressaient aux apprentissages d'élèves de la fin du primaire (soit des élèves de 5^e et 6^e année au Québec), un groupe d'âge qui n'est pas très différent de celui des enfants qui commencent le secondaire. Sachant que le passage du primaire au secondaire est une période cruciale en ce qui concerne l'évolution de l'intérêt des jeunes pour les matières scientifiques à l'école (Potvin et Hasni, 2014), cette période charnière gagnerait à être mieux étudiée sous l'angle de l'enseignement de la génétique. On pourrait d'ailleurs dire la même chose de l'enseignement de la génétique au primaire : les élèves du primaire possèdent une curiosité naturelle qui pourrait être mise à profit pour les initier aux grandes idées de la génétique à l'aide d'activités d'enseignement-apprentissage à leur portée.
- Nous ne nous sommes pas intéressés à la formation des maîtres. Leur formation initiale et continue en science au secondaire est pourtant cruciale, puisque des maîtres formés adéquatement sont plus susceptibles de bien

enseigner les matières scolaires. Il nous apparaît que la question de la formation des maîtres en génétique est un sujet de recherche qui devrait recevoir plus d'attention à l'avenir.

- Nous nous sommes limités aux recherches qui ont publié des résultats empiriques. En faisant ce choix, nous nous sommes privés des riches réflexions théoriques concernant l'enseignement de la génétique, en particulier les progressions des apprentissages proposées par de nombreux chercheurs en sciences de l'éducation. Ces travaux théoriques sont en effet d'une grande importance pour qui souhaite mieux planifier et mettre en place des séquences d'enseignement-apprentissage optimales. Mais une théorie n'est jamais aussi valable que les données qui la soutiennent; de ce point de vue, nous espérons avoir fait œuvre utile en présentant des résultats de recherche qui permettent de porter un jugement sur diverses propositions théoriques en fonction des appuis qu'elles reçoivent de la part des recherches empiriques.
- Nous nous sommes limités aux résultats de recherches publiées au cours de la décennie 2009-2019. La recherche en sciences de l'éducation concernant l'enseignement de la génétique au secondaire se poursuit, bien entendu, et il pourrait être pertinent d'instaurer un observatoire de l'enseignement de la génétique au secondaire dont le mandat serait de mener une veille active des publications scientifiques dans le domaine et d'en publier un bilan annuel, afin de suivre l'évolution de la recherche.



Présentation des résultats

Dans les sections suivantes, les résultats de la recherche à propos de l'enseignement de la génétique au secondaire, basés sur des données probantes recueillies à la suite d'interventions éducatives menées auprès des élèves, seront présentés à l'intérieur de rubriques qui traitent des principales préoccupations des chercheuses et des chercheurs qui se sont intéressés à ces questions et dont les études visent à l'amélioration de l'enseignement de cette matière en classe.

Nous avons également décidé d'intégrer au rapport une description détaillée des questions de recherche, des thèmes étudiés, des participants, des outils de collecte et d'analyse des données, de même qu'une description détaillée des conclusions et recommandations de chacun des articles retenus. Nous espérons que cela permettra, à la lectrice et au lecteur, de mieux comprendre le contexte ayant mené aux résultats des études.

Progressions des apprentissages en génétique au secondaire

L'étude de la progression des apprentissages (PdA, *Learning progression*, en anglais) des élèves dans divers domaines scientifiques, des moyens de les mettre en pratique en classe, de même que leur évaluation, est un champ de recherche très actif en sciences de l'éducation (Todd, Romine et Cook Whitt, 2017). La génétique ne fait bien sûr pas exception, comme en font foi les travaux de Catley, Lehrer et Reiser (2005), Duncan, Rogat et

Yarden (2009), Duncan, Castro-Faix et Choi (2014), Duncan *et al.* (2017), Elmesky (2013), Roseman *et al.* (2006), Shea et Duncan (2013), Todd (2013), Todd et Kenyon (2016) et Todd, Romine et Cook Whitt (2017). L'objectif de ces recherches est d'identifier les concepts à enseigner en génétique, en se basant sur une analyse épistémologique et conceptuelle du domaine, puis de déterminer la meilleure façon, étape par étape, sous-concept par sous-concept, d'amener les élèves à s'appropriier les notions à l'étude de manière optimale. Diverses progressions des apprentissages « théoriques » en génétique ont été proposées par différents auteurs, mais nous ne rendrons compte ici que des études qui les ont testées dans des classes du secondaire, en lien avec un enseignement explicite, et qui ont rapporté des données empiriques à l'appui de leurs conclusions.

Un important débat agite la communauté des chercheuses et des chercheurs qui étudient les PdA en génétique : celui de savoir s'il vaut mieux commencer l'enseignement par la présentation du modèle classique de Mendel, ou plutôt par les bases moléculaires de la génétique. Ainsi, la PdA conçue par Roseman *et al.* (2006) propose de débiter par le modèle moléculaire, en s'appuyant sur l'idée que les concepts clés de la génétique classique (chromosomes, gènes et allèles) demeurent très abstraits pour les élèves et seraient sans doute mieux appréhendés si ces derniers avaient au départ une compréhension adéquate des mécanismes moléculaires sous-jacents impliquant l'ADN et les protéines. Pour Duncan, Rogat et Yarden (2009), au contraire, les deux modèles, classique et moléculaire, devraient être enseignés en parallèle, afin de rendre explicites les liens qui existent entre les deux. Ces derniers auteurs vont plus loin en présentant huit « grandes idées » qui devraient occuper un rôle central dans l'enseignement de la génétique au secondaire :

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

- Tous les organismes sont porteurs d'une information génétique organisée de manière hiérarchique ;
- L'information génétique contient des instructions universelles qui définissent la structure des protéines ;
- Les protéines jouent un rôle central dans le fonctionnement de tous les organismes vivants et constituent l'élément qui relie les gènes et les traits ;
- Toutes les cellules possèdent la même information génétique, mais des cellules de nature différente (par exemple, les cellules endothéliales, épithéliales, etc.) utilisent (expriment) des gènes différents ;
- Les organismes se reproduisent en transférant leur information génétique à la génération suivante ;
- Il existe des schémas de corrélation entre les gènes et les traits et il y a certaines probabilités pour que ces schémas se reproduisent ;
- Les modifications de l'information génétique peuvent entraîner des changements dans notre apparence et dans le fonctionnement de notre corps (phénotype), et ces variations, lorsqu'elles concernent l'ADN, peuvent servir à identifier chaque individu de chaque espèce et chaque espèce ;
- Les facteurs environnementaux peuvent interagir avec notre information génétique.

Une première tentative pour trancher la question « moléculaire ou mendélien d'abord » a été faite par Duncan, Castro-Faix et Choi (2016), qui se sont demandé si le fait de commencer l'enseignement de la génétique par la présentation du modèle moléculaire aidait davantage les élèves à comprendre la génétique mendélienne ou vice-versa. Les chercheurs ont enrôlé dans leur étude 117 élèves étasuniens de 7^e année et de classes mixtes (allant de la 6^e à la 8^e année) ; les participants étaient

donc âgés de 10 à 13 ans environ. L'enseignement consistait en une série de modules consacrés aux modèles génétiques moléculaire et mendélien et aux liens existants entre les deux, et permettait l'appropriation progressive de concepts de plus en plus complexes. Les élèves l'ont suivi pendant deux années consécutives. La première année de l'étude, l'enseignement a débuté par la présentation du modèle moléculaire, suivi de celle du modèle classique ; la seconde année, l'enseignement a débuté par la génétique mendélienne, puis s'est poursuivi par la présentation de la génétique moléculaire. Il existait quelques différences entre les contenus des deux années, mais les chercheurs les présentent comme étant mineures.

Les chercheurs ont fait passer aux élèves un questionnaire contenant des questions à choix multiples ainsi que des questions ouvertes à quatre reprises, soit au début et à la fin de chaque année scolaire. Les résultats de l'analyse suggèrent que l'apprentissage de la génétique moléculaire par les élèves pourrait avoir un effet catalyseur, quoique faible, sur leurs apprentissages ultérieurs en génétique mendélienne. Il se peut que leur compréhension des mécanismes physiques et moléculaires par lesquels les gènes produisent des traits observables chez un individu (génétique moléculaire) leur permette de mieux se préparer à saisir les liens existants entre les gènes et les traits observables d'une génération à l'autre (génétique mendélienne). Cela dit, les gains et les différences observés d'une prise de mesure (questionnaire) à l'autre sont demeurés faibles tout au long de l'étude. Malgré tout, les résultats amènent les auteurs à conclure que, en ce qui concerne les deux PdA proposées, leur recherche tend à soutenir davantage la proposition de Roseman *et al.* (2009) puisque, bien que l'on constate des influences (corrélations) modestes entre les deux modèles de génétique, et ce, quel que soit l'ordre de leur enseignement

(moléculaire puis mendélien ou mendélien puis moléculaire), l'influence positive de l'apprentissage de la génétique moléculaire sur la génétique mendélienne est légèrement plus forte.

Quoi qu'il en soit, de l'aveu même de Duncan, Castro-Faix et Choi (2016), leurs travaux prêtent le flanc à la critique du fait du nombre relativement faible d'élèves participants, ce qui réduit la puissance statistique de leurs analyses, et aussi étant donné que les modules d'enseignement utilisés au cours des deux années de l'étude étaient peut-être suffisamment différents pour générer un biais envers l'un ou l'autre des modèles. Ils notent également que la pause estivale, entre l'an 1 et l'an 2 de l'étude, s'est traduite par une importante régression dans les apprentissages des élèves en génétique, qui ont essentiellement dû « réapprendre » les concepts au cours de l'an 2, année qui commençait par la présentation de la génétique mendélienne.

Pour tenter de remédier à ces difficultés, Duncan *et al.* (2017) ont conçu deux modules d'enseignement similaires, d'une durée de quatre semaines chacun (huit semaines au total), pour comparer les deux approches inspirées par les PdA de Roseman *et al.* (2006) et de Duncan, Rogat et Yarden (2009). Ils les ont testées en alternance auprès de 268 élèves étasuniens de 11^e année répartis à parts égales en deux groupes : l'un débutant par la présentation du modèle moléculaire et l'autre, par le modèle mendélien. Dans les deux modules, les chercheurs se sont concentrés sur les concepts le plus souvent enseignés dans les cours de biologie au secondaire. Dans chacun des modules, les élèves étaient invités à étudier différents scénarios contradictoires dans le but d'être en mesure de répondre à des questions de génétique. Un soin particulier a été pris pour leur offrir des outils conceptuels adaptés ainsi que pour leur faire acquérir le vocabulaire adéquat afin qu'ils puissent débattre et développer leur compréhension des modèles en génétique.

La comparaison des réponses au prétest et au post-test a montré que les élèves des deux groupes (classique et moléculaire) ont amélioré de manière significative leur compréhension des concepts visés en génétique. Bien que les gains d'apprentissage des élèves du groupe moléculaire étaient légèrement plus élevés que ceux des élèves du groupe classique pour tous les concepts étudiés, la différence observée n'était pas significative. Malgré de nombreuses limitations liées à la façon dont les données ont été recueillies, les chercheurs croient que ces résultats indiquent qu'il serait quelque peu avantageux d'enseigner le modèle moléculaire avant le classique en génétique, mais d'autres études devront être faites afin de trancher définitivement la question.

Duncan *et al.* (2017) remarquent également que les modules qu'ils ont développés pour cette étude, basés sur l'utilisation par les élèves de scénarios et de modèles de raisonnement en génétique, semblent donner de meilleurs résultats qu'un enseignement plus traditionnel (manuel scolaire, discussions en classe, etc.), bien que l'absence d'un groupe témoin les empêche de tirer une telle conclusion de manière définitive. Mais en élaborant leur instrument de mesure en vue de l'étude menée auprès des élèves du secondaire, les auteurs signalent qu'ils ont soumis leur questionnaire à des étudiants de niveau universitaire et que ceux-ci ont moins bien répondu aux questions que les élèves de 11^e année après l'enseignement des modules, ce qui pourrait indiquer là aussi la supériorité de leurs modules d'enseignement.

De leur côté, Todd et Kenyon (2016) ont cherché à affiner la PdA originale proposée par Duncan, Rogat et Yarden (2009) en examinant l'évolution des connaissances de 121 élèves étatsuniens de 10^e année pendant une année scolaire complète. L'enseignement a suivi une progression particulière : tout

d'abord, présentation du modèle moléculaire de la génétique, puis introduction des modèles méiotique (cellule) et classique (Mendel). L'analyse de l'évolution des savoirs des élèves, basée sur des entretiens et des productions écrites, a permis de constater que même après l'enseignement, les élèves avaient de la difficulté à comprendre que les gènes codent pour la production des protéines, que les protéines constituent le lien entre les gènes et les traits, et que l'expression différentielle des gènes à l'intérieur de cellules spécialisées produit des protéines différentes. Les chercheuses concluent que l'enseignement de la génétique en classe devrait se concentrer davantage sur les protéines : de quelle manière sont-elles produites, quelles sont leurs fonctions et comment différentes cellules produisent-elles différentes protéines ?

Les travaux de Todd, Romine et Cook Whitt (2017) visaient, quant à eux, à développer et à valider un instrument qui servirait à mesurer les apprentissages d'élèves ayant étudié des concepts en génétique en suivant une PdA inspirée des travaux de Todd et Kenyon (2016), elle-même issue des travaux de Duncan, Rogat et Yarden (2009) et de Shea et Duncan (2013). Les participants étaient des élèves étasuniens de 10^e année d'une école à vocation scientifique. L'enseignement s'est étalé sur environ seize semaines et son objectif était l'apprentissage de douze concepts en génétique (les huit concepts originaux de Duncan, Rogat et Yarden (2009) modifiés et augmentés à la lumière de travaux subséquents), tels que décrits ci-dessous :

- L'information génétique est organisée de manière hiérarchique ;
- L'information génétique définit la structure des protéines ;
- Les protéines assument un grand nombre de fonctions au sein de la cellule ;

- Les protéines constituent le lien entre les gènes et les traits;
- Chaque type de cellules expriment des gènes spécifiques;
- L'information génétique est transmise de génération en génération;
- Il existe des schémas de corrélation entre les gènes et les traits;
- L'ADN varie entre les espèces et au sein d'une même espèce;
- Des modifications de l'information génétique entraînent une variation accrue des phénotypes et peuvent être à l'origine de l'évolution d'une espèce;
- L'environnement interagit avec l'information génétique;
- Seules les mutations présentes dans l'information génétique des gamètes peuvent être transmises à la descendance;
- L'expression des gènes peut changer à tout moment de la vie d'un organisme.

Les divers niveaux d'organisation en génétique et les liens qui existent entre ces différents niveaux (moléculaire, cellulaire et organisme) ont aussi été expliqués aux élèves. L'apprentissage par résolution de problèmes complexes était l'approche d'enseignement privilégiée dans cette étude.

Trois prises de mesure ont été effectuées à l'aide de l'instrument développé par les chercheurs : une avant le début de l'enseignement, une au milieu et une à la fin. Les chercheurs ont constaté une progression significative des apprentissages des élèves entre le début et la fin de l'activité d'enseignement pour chacun des douze concepts, avec des tailles d'effet modérées entre chaque prise de mesure. Pour l'ensemble de la séquence, entre le début et la fin de l'enseignement, la taille d'effet est

encore plus importante, ce qui souligne la qualité et l'importance des gains d'apprentissage réalisés par les apprenants. Les auteurs en concluent que des élèves de 10^e année que l'on guide sur une assez longue période à travers une PdA bien conçue sont capables de faire des apprentissages importants et significatifs à propos des concepts clés de la génétique.

Wu *et al.* (2014) ont eux aussi abordé la question de l'ordre de présentation des concepts en génétique, mais d'une façon différente. Chez 169 élèves taïwanais de 7^e année (âgés de 13 à 14 ans), ils ont comparé la compréhension de trois textes traitant de génétique, issus de divers manuels scolaires et qui se distinguaient sur un point : l'ordre de présentation des concepts en génétique. Le premier texte expliquait, tout d'abord, les cellules et les chromosomes, puis les modèles mitotique et méiotique de la division cellulaire, le modèle génétique classique (mendélien), le modèle moléculaire, les chromosomes et les gènes. Dans le deuxième, le texte commençait plutôt par l'aspect « reproduction » du modèle génétique classique, avant d'enchaîner sur les cellules et les chromosomes, les modèles mitotique et méiotique, la partie « fécondation » du modèle génétique, le modèle moléculaire, les chromosomes et les gènes. Enfin, le troisième texte présentait les concepts dans un ordre inspiré des travaux de Roseman *et al.* (2006) : le matériel génétique (ADN et protéines), le modèle moléculaire, les modèles mitotique et méiotique, et le modèle génétique classique.

Les textes ont été découpés en quatre parties ; chaque semaine, les élèves devaient lire une partie, puis répondre à une série de questions en lien avec le contenu du texte. À la fin de l'expérience, les élèves ont été invités à réviser leurs réponses et à remplir un questionnaire à choix multiples contenant également des questions de type « vrai ou faux ». L'analyse des résultats montre que les élèves qui ont lu le premier texte ont

fait des gains d'apprentissage significativement supérieurs à ceux des deux autres groupes, en particulier en ce qui a trait à leur compréhension des modèles de la méiose et de la mitose. Il faut cependant noter que les élèves qui ont participé à cette expérience ont appris de manière autonome par le biais de la seule lecture de textes issus de manuels scolaires; il est donc possible que les apprentissages soient surtout dus au travail de la mémoire (*rote learning*). L'influence d'un enseignant expérimenté et d'une approche d'enseignement plus active aurait peut-être donné des résultats différents.

Devant la difficulté constatée chez de nombreux élèves d'apprendre des concepts complexes en génétique, malgré la mise en place de PdA sophistiquées proposant un ordonnancement idéal des concepts, on peut se demander si une partie du problème ne viendrait pas de la façon dont ces concepts sont présentés aux élèves, du rythme auquel ils sont enseignés, de la manière dont les liens entre eux sont expliqués, etc. Dans une étude menée en deux temps, Chu et Reid (2012) ont tenté de répondre à ces questions. Ils se sont d'abord intéressés à la surcharge de la mémoire de travail des apprenants comme source possible des difficultés d'apprentissage des concepts complexes en génétique, puis ils ont tenté de développer une approche d'enseignement visant justement à éviter une telle surcharge. Les thèmes abordés dans leur étude menée à Taiwan reflétaient le contenu du programme scolaire secondaire de ce pays : terminologie de base de la génétique, lois de Mendel, carré de Punnett, génétique humaine, reproduction sexuée, génie génétique et questions socioscientifiques liées à la génétique. Des élèves de 13 et 14 ans y ont participé : 141 dans la première partie de l'étude et 361 dans la seconde.

Dans la première partie, les chercheurs ont sondé la mémoire de travail, les connaissances préalables et la performance

des élèves à l'aide de divers tests et questionnaires, en biologie et en génétique, et ont découvert que les élèves étaient peu familiers avec les termes et les concepts de la génétique ; il ressortait de leurs réponses une forte impression de confusion. D'autre part, l'analyse des corrélations entre la mémoire de travail et les résultats aux tests montre que la mémoire de travail est bien un facteur important pour expliquer les difficultés rencontrées par les élèves dans l'enseignement de la génétique. En d'autres termes, la génétique est un sujet scolaire difficile parce que, par sa nature même, il exerce une très grande pression sur la mémoire de travail des élèves. De ce point de vue, la maîtrise d'un contenu notionnel minimal devient un élément important dans l'allocation optimale des ressources de la mémoire de travail, et donc dans la réussite de l'apprentissage : les élèves qui savent déjà en partie sur quoi se concentrer pour accomplir une tâche spécifique, tout en ne portant pas attention à ce qui n'est pas pertinent, surchargent moins leur mémoire de travail que ceux qui n'ont pas les connaissances suffisantes pour différencier ce qui est pertinent de ce qui ne l'est pas et qui doivent donc se concentrer sur tous les éléments de la tâche.

En se basant sur ces constatations, Chu et Reid (2012) ont développé une séquence d'enseignement de la génétique visant à minimiser la surcharge de la mémoire de travail. Dans cette nouvelle approche, les concepts de la génétique ont été organisés avec beaucoup de soin, les idées complexes ont été découpées en unités minimales, les buts de chaque leçon ont été clairement expliqués, le vocabulaire a été défini avec précision, du temps de pratique et de rétroaction a été intégré dans la séquence, la révision des connaissances était omniprésente et de nombreux points d'ancrage ont été établis en s'appuyant sur des exemples de la vie courante. Cette séquence a été testée auprès d'un groupe traitement, tandis qu'un groupe témoin

étudiait le même contenu selon une approche plus traditionnelle. Les chercheurs ont utilisé les examens scolaires, des jeux d'association de mots et un questionnaire d'attitude pour comparer les deux groupes. Les résultats montrent des gains d'apprentissage significativement plus importants pour les élèves du groupe traitement ; les chercheurs ont aussi découvert des gains similaires en termes d'intérêt et d'attitude. En effet, les élèves du groupe traitement montraient un intérêt plus marqué et une attitude plus positive envers l'étude de la génétique. Cette nouvelle séquence d'enseignement visant à minimiser la surcharge de la mémoire de travail des élèves semble donc favoriser leurs apprentissages en génétique.

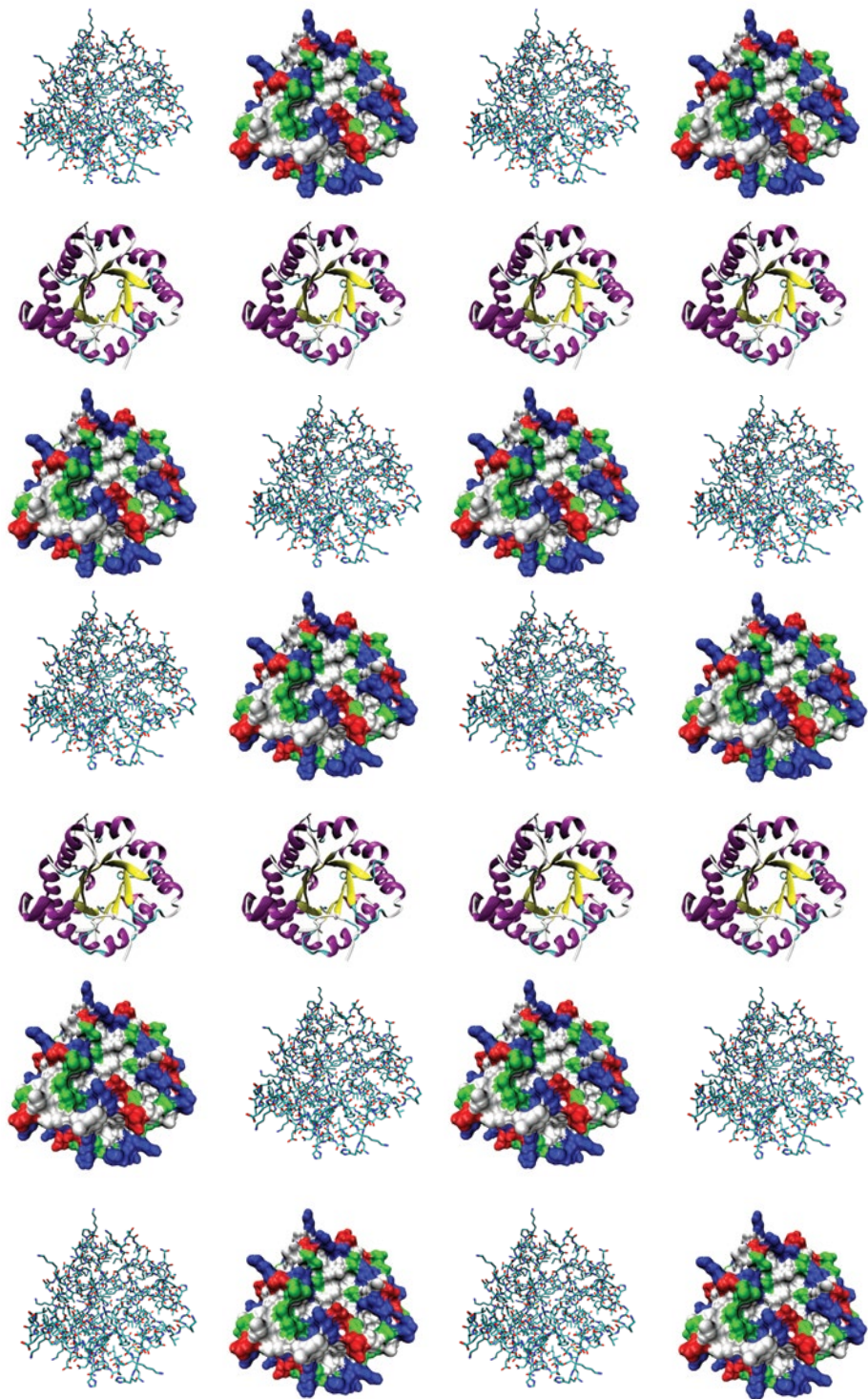
À l'instar des conclusions de Kampaourakis et Zogza (2009, voir section « Conceptions et changement conceptuel en génétique »), qui préconisent de commencer tôt dans le cursus scolaire l'enseignement des concepts de base en génétique, Duncan *et al.* (2011) se sont demandé s'il ne serait pas préférable de présenter ces concepts tout au début du secondaire, afin d'initier les élèves plus jeunes à cette matière et de pouvoir y revenir souvent et tout au long de leur scolarité au secondaire. À long terme, une telle approche pourrait, selon les chercheurs, mener à la proposition d'une PdA répartie sur plusieurs années scolaires et qui présenterait des concepts en génétique adaptés à l'âge des élèves visés.

Duncan *et al.* (2011) ont donc conçu une séquence d'enseignement à propos de la génétique moléculaire destinée à des élèves étasuniens de 7^e année. Cette séquence durait deux semaines et présentait les concepts de base de la génétique moléculaire, en particulier le rôle des protéines dans divers phénomènes génétiques. Les objectifs d'apprentissage étaient les suivants : les gènes contiennent l'information nécessaire pour fabriquer des protéines ; les protéines remplissent de

nombreuses fonctions différentes à l'intérieur des cellules ; les protéines constituent le lien entre le génotype (l'information génétique) et le phénotype (les traits) d'un individu. Après la présentation du rôle des protéines par le biais d'une bande dessinée, la séquence d'enseignement proposait aux élèves d'étudier les relations entre génotype et phénotype au moyen d'études de cas, c'est-à-dire des textes décrivant différents sujets en rapport avec la génétique (intolérance au lactose, OGM, production de l'insuline, etc.). Finalement, à la fin de la séquence, les élèves prenaient connaissance d'un nouveau cas de maladie génétique (drépanocytose) et étaient invités à discuter et à modéliser les mécanismes cellulaires et moléculaires à l'origine de cette pathologie, puis à réviser leur modèle à la lumière de nouvelles informations qui leur étaient fournies.

Au total, 135 élèves, placés sous la responsabilité de deux enseignants différents (un homme et une femme), ont participé à cette étude, au cours de laquelle on a récolté des données à l'aide d'un questionnaire pré- et post-intervention, ainsi qu'en recueillant et en analysant ce que les élèves avaient produit durant l'activité finale consacrée à l'étude de la drépanocytose. Les résultats montrent une forte asymétrie des gains en apprentissage entre les deux groupes. Ces gains étaient plus importants chez les élèves de l'enseignante que chez ceux de son collègue masculin, malgré le fait que tous avaient suivi, à peu de choses près, le même enseignement. Les chercheurs remarquent qu'au moins la moitié des élèves de l'enseignante ont fait des progrès importants en termes de connaissances liées au rôle des gènes et des protéines pour expliquer des phénomènes en génétique, jusqu'à être en mesure d'appliquer leurs savoirs à la résolution d'un problème nouveau (le cas de drépanocytose). Cela semble indiquer que de jeunes élèves sont effectivement en mesure de faire preuve d'une capacité

de réflexion plus élevée en génétique après un enseignement ciblé. Par contre, les chercheurs ne s'expliquent pas exactement pourquoi les élèves de l'enseignante ont systématiquement mieux réussi que ceux de son collègue masculin, sinon par des différences mineures constatées dans l'application de la séquence d'enseignement dans les deux classes et qui se sont avérées plus importantes que prévu. Les chercheurs croient tout de même que leur étude, une première avec des élèves si jeunes, milite en faveur du développement d'une PdA en génétique qui débute tôt et qui assure un suivi continu des connaissances des élèves en génétique tout au long de leur scolarité au secondaire.



Apprentissage des différents niveaux d'organisation en génétique (modèles individuels, cellulaires et moléculaires)

Une bonne littératie en génétique implique la compréhension de trois niveaux d'organisation, qui se traduisent par trois modèles interdépendants : un modèle qui décrit la transmission de l'héritage génétique au niveau individuel, un modèle cellulaire qui décrit le processus de division cellulaire à l'origine de la reproduction, et un modèle moléculaire qui décrit les mécanismes qui relient le génotype au phénotype chez un individu par le biais de l'ADN et des protéines. Plusieurs études se sont en particulier penchées sur le rôle central que jouent les protéines en tant que médiatrices entre le codage de l'information génétique présente dans l'ADN et les processus génétiques qui se déroulent dans les cellules, les organes et l'ensemble de l'organisme.

Duncan et Tseng (2011) se sont intéressés à la compréhension que les élèves sont en mesure de développer du rôle central que jouent les protéines dans les phénomènes génétiques (transmission des traits, fonctionnement des organes, etc.). L'activité éducative qu'ils ont mise en place avait pour objectif d'aider les élèves à établir des liens fonctionnels entre les entités situées au niveau moléculaire (protéines, ADN), au niveau cellulaire (gènes) et au niveau de l'organisme (traits, fonctionnement des organes), afin qu'ils puissent se représenter la génétique sous la forme d'un système hiérarchisé et hybride. De manière plus spécifique, les chercheurs visaient à enseigner les concepts clés suivants : l'information génétique définit la structure des protéines ; les protéines sont les agents centraux par lesquels passent tous les processus génétiques ; la séquence d'acides aminés qui constitue une protéine détermine sa structure et sa fonction ; la compréhension des phénomènes génétiques

exige des raisonnements faisant intervenir plusieurs niveaux de complexité interreliés. Pour ce faire, les chercheurs ont choisi de bâtir leur module d'enseignement autour de l'étude de l'hypercholestérolémie familiale et de ses déterminants génétiques. L'intervention a duré cinq semaines en tout.

Les chercheurs ont récolté des données auprès d'un peu plus d'une centaine d'élèves étasuniens de quatre classes de 8^e et 9^e année à l'aide d'un questionnaire et d'entrevues pré- et post-intervention, ainsi qu'en recueillant les productions des élèves et en analysant des captations vidéo de leçons données en classe. Des entretiens pré- et post-intervention plus approfondis ont également été menés auprès de 11 élèves de 9^e année. Les résultats suggèrent que les conceptions des élèves sur la nature de l'information génétique ont considérablement évolué suite à l'enseignement. Avant celui-ci, ils avaient tendance à concevoir les gènes comme des éléments non informationnels ou comme détenant des informations sur des entités situées à plusieurs niveaux d'organisation différents (cellules, tissus, organes, etc.). Après l'enseignement, cependant, une proportion beaucoup plus importante d'élèves considérait que les gènes contenaient des informations sur la fabrication des protéines; ils ont pu ainsi relier les gènes aux protéines et comprendre que le lien entre ces deux éléments était à l'origine de la détermination des traits (phénotype). De plus, plusieurs élèves ont été en mesure de réfléchir sur la façon dont des changements de l'ADN pourraient affecter la structure et donc la fonction d'une protéine. Cependant, il a été constaté que même après l'enseignement, plusieurs élèves avaient encore une compréhension limitée des différentes fonctions que les protéines exercent dans le corps humain. Les auteurs en concluent que le développement chez les élèves d'une vision plus complète de la génétique, en tant qu'ensemble de structures hiérarchiques

imbriquées et interreliées, nécessite un programme d'enseignement bien ciblé et à long terme.

Au moyen d'une série de huit leçons de 40 minutes chacune réparties sur huit semaines, Freidenreich, Duncan et Shea (2011) ont permis à des élèves étasuniens, de la 6^e à la 8^e année, d'explorer les liens qui existent entre ces trois niveaux d'organisation génétique : le niveau individuel (transmission des gènes, croisements génétiques, maladies héréditaires, phénotypes), le niveau cellulaire (division cellulaire, méiose) et le niveau moléculaire (rôle de l'ADN et des protéines). Le rôle de l'environnement (épigénétique) a aussi été abordé. Cette recherche est basée sur la PdA en génétique proposée par Duncan, Rogat et Yarden (2009) pour des élèves de la 5^e à la 10^e année.

À l'aide d'un pré- et d'un post-test, les chercheurs ont constaté des gains en apprentissage hautement significatifs, avec des tailles d'effet élevées, ainsi qu'une meilleure capacité de la part des élèves à utiliser des concepts issus des trois niveaux d'organisation pour expliquer divers phénomènes en génétique. Cette recherche n'incluait pas de groupe témoin. L'intégration en un tout cohérent et les nombreux liens tissés entre les trois niveaux d'organisation génétique ont ainsi été bénéfiques à la compréhension des élèves, quoiqu'il soit demeuré quelques lacunes, en particulier en ce qui concerne le rôle des cellules sexuelles dans la transmission des traits et le rôle des protéines. D'autre part, les chercheurs remarquent que la compréhension des élèves concernant les liens entre les trois niveaux d'organisation génétiques aurait pu être plus solide. Malgré tout, les résultats de cette étude démontrent qu'un enseignement ciblé permet à des élèves relativement jeunes de raisonner en s'appuyant sur les trois niveaux d'organisation génétique.

Gericke et Wahlberg (2013) se sont demandé comment des élèves suédois de 11^e année du secondaire comprenaient les

concepts en génétique moléculaire associés à la synthèse des protéines, quels étaient les liens qu'ils établissaient entre ces différents concepts et s'ils étaient en mesure d'expliquer correctement la synthèse des protéines en utilisant la nomenclature scientifique. Les chercheurs ont recueilli des données en interrogeant 12 élèves, regroupés en dyades ou en triades, au sujet de leurs connaissances en génétique moléculaire et au sujet de la synthèse des protéines. On leur a également demandé de créer des cartes conceptuelles pour décrire leurs savoirs, d'abord en cours d'entrevue, puis après. L'analyse du discours des élèves et de leurs productions s'est donc faite de manière chronologique, afin de suivre l'évolution de leurs apprentissages dans le temps.

Avant les entrevues, les chercheurs ont identifié une liste de concepts en génétique que les élèves étaient le plus susceptibles de connaître déjà, suite aux apprentissages faits dans des cours de biologie précédents. De cette liste, quatre concepts centraux en génétique moléculaire ont été identifiés : chromosome, ADN, gène et protéine. Au début de l'entrevue, les chercheurs ont remis à chaque groupe d'élèves quatre bouts de papier mentionnant ces concepts et leur ont demandé d'en discuter entre eux. Chaque fois que la discussion faisait émerger un autre des concepts en génétique préalablement identifiés par les chercheurs (voir les mots entre parenthèses dans l'énumération faite plus loin dans le texte), les élèves recevaient un autre bout de papier, jusqu'à ce que la liste soit épuisée. À la fin de la conversation, les élèves étaient invités à terminer leur carte conceptuelle.

Les résultats de l'analyse du discours des élèves et des cartes conceptuelles indiquent que le concept le plus important pour les élèves était l'ADN, puisqu'il servait de lien entre les concepts de gènes et de protéines, même s'ils ne mentionnaient pas le

rôle codant des gènes. Les élèves ont aussi spontanément introduit des concepts de la génétique classique (mendélienne) pour expliquer la génétique moléculaire. Cela démontrait une certaine confusion de leur part entre le génotype et le phénotype, confusion que les auteurs attribuent en partie à la façon dont les modèles classique et moléculaire de la génétique sont dépeints dans les manuels scolaires. L'une des conséquences d'une lecture « classique » du modèle moléculaire est que les élèves ont tendance à se concentrer sur les règles de l'hérédité plutôt que sur les processus moléculaires sous-jacents. Les chercheurs ont aussi constaté que lorsque les élèves parlaient d'héritage génétique (traits), ils ne faisaient pas de liens entre les concepts de gène, d'ADN et de protéine.

Les cartes conceptuelles construites par les élèves lors des différents entretiens étaient assez similaires, dans la mesure où certains concepts apparaissaient systématiquement regroupés au sein de grappes de concepts interreliés. Cinq grappes principales ont ainsi été identifiées :

- La grappe centrale (chromosome, ADN, gène et protéine);
- La grappe messenger (ARNm, ADN, gène, exon, intron);
- La grappe de transfert (ARNt, protéine, acide aminé, ADN);
- La grappe des protéines (protéine, polypeptide, enzyme);
- La grappe de transmission (ADN, gène, chromosome, protéine, trait).

Les élèves étaient plus à même d'établir des liens entre les concepts d'une même grappe qu'entre les concepts de grappes différentes. Les chercheurs croient que ces grappes sont représentatives de la façon dont les élèves organisent dans leur tête leurs savoirs en génétique, et pourraient donc être utilisées comme point de départ pour l'enseignement de cette

matière. Ils recommandent en outre que les cours de génétique se concentrent d'abord sur les liens existants entre les concepts de différentes grappes, puis mettent en évidence les concepts transversaux qui se retrouvent dans deux ou plusieurs grappes, tels l'ADN, le chromosome, le gène et la protéine.

Pour mieux comprendre la capacité de discernement des élèves du secondaire vis-à-vis des différents modèles génétiques présentés dans les manuels scolaires, Gericke, Hagberg et Jorde (2013) ont fait lire des extraits de deux manuels suédois à 41 élèves de la fin du secondaire (11^e et 12^e années), âgés de 18 et 19 ans. Les élèves participants étaient des volontaires, puisque cette étude a été menée en dehors des périodes normales d'enseignement. Le premier extrait portait sur la génétique mendélienne et le modèle classique, tandis que le second portait plutôt sur les modèles moléculaire et cellulaire. Les chercheurs voulaient savoir jusqu'à quel point les élèves étaient en mesure de discerner et de comprendre les différents modèles expliquant le rôle des gènes dans les divers mécanismes génétiques (voir Gericke et Hagberg, 2007).

Les élèves ont été répartis en deux groupes, chacun devant lire l'un des deux extraits. Une semaine plus tard, on leur a demandé de remplir un questionnaire à choix multiples au sujet du texte qu'ils avaient lu, puis de lire l'autre texte et, une autre semaine plus tard, de remplir à nouveau le même questionnaire en lien avec cette seconde lecture. Enfin, un dernier questionnaire les interrogeait sur les similitudes et les différences perçues entre les deux textes. Neuf élèves, choisis en fonction de leurs réponses aux questionnaires, ont aussi participé à des entretiens semi-dirigés qui ont permis de valider leurs réponses.

Les résultats montrent que les élèves ont eu plus de facilité à identifier le modèle classique que les deux autres modèles, tels que présentés dans les deux textes, et qu'ils avaient de la

difficulté à comprendre comment les autres modèles (génétique et moléculaire) décrivaient le rôle des gènes ainsi que les différences conceptuelles entre les modèles. Les réponses des élèves révèlent une vision de la génétique basée sur le modèle classique, où les explications causales des phénomènes génétiques se font du niveau de l'individu (phénotype) vers le niveau moléculaire (génotype), et non l'inverse.

En entrevue, les élèves interrogés ont aussi eu du mal à expliquer de manière cohérente les différences entre les deux textes. Ils n'ont pas non plus perçu de contradiction ou de conflit conceptuel entre les deux textes, qui présentaient pourtant des modèles cherchant à expliquer, de façon très différente l'un de l'autre, le rôle des gènes. Pour les élèves, les deux textes donnaient plutôt deux descriptions complémentaires du rôle des gènes. Enfin, il s'est avéré que les élèves conçoivent les différents modèles génétiques comme autant de niveaux de généralisation d'une même idée, et non pas comme différentes visions théoriques de ce qu'est un gène et de son rôle dans l'organisation du vivant, ou encore comme différents niveaux d'organisation génétique. Les chercheurs y voient une lacune dans la façon dont on enseigne aux élèves la nature de l'activité scientifique, un enseignement où les modèles conceptuels sont des constructions humaines qui tentent de rendre compte au mieux de phénomènes complexes, mais sans prétendre à une quelconque « vérité » absolue, et aussi où plusieurs modèles distincts peuvent cohabiter sans contradiction.



Conceptions et changement conceptuel en génétique

Les élèves arrivent en classe de science avec un certain nombre d'idées préconçues, des explications personnelles à propos du fonctionnement du monde naturel (Novak, 1977), et ces explications personnelles font souvent obstacle à l'enseignement des concepts scientifiques à l'école (Duit et Treagust, 2003). Dans les écrits de recherche en didactique des sciences, ces idées préconçues sont désignées de diverses manières : on parle de conceptions alternatives (Driver et Easley, 1978 ; Driver, 1981), de fausses conceptions (Helm, 1980), de conceptions basées sur le « gros bon sens » (Halloun et Hestenes, 1985), de conceptions initiales (Chi, Slotta et de Leeuw, 1994), de conceptions issues de la vie quotidienne (Lewis et Kattmann, 2004) ou encore de conceptions premières (Potvin *et al.*, 2012). L'enseignement des sciences a alors comme but de rendre ces conceptions explicites au sein de la classe et de les faire évoluer vers des concepts scientifiques. Ancrées dans le constructivisme et le socioconstructivisme – des approches éducatives qui centrent le processus d'apprentissage sur l'élève, son travail conceptuel et les différentes interactions sociales auxquelles il participe –, les théories du changement conceptuel ont été étudiées à quelques reprises dans le contexte de l'enseignement de la génétique au secondaire.

Par exemple, Kampourakis et Zogza (2009) ont testé l'efficacité d'une séquence d'enseignement constructiviste sur l'évolution des conceptions alternatives de 98 élèves grecs de 3^e année du secondaire (âgés de 14 et 15 ans) en appliquant cette séquence au processus d'évolution des espèces. Les données pré- et post-intervention ont été recueillies à l'aide d'un questionnaire à questions ouvertes. L'approche éducative préconisée prenait en compte les conceptions premières des

élèves, provoquant chez eux des conflits cognitifs, et établissait des liens clairs entre les différents niveaux d'organisation des systèmes impliqués dans les mécanismes de reproduction et d'évolution des espèces, incluant l'effet du hasard, de l'indétermination et de l'environnement.

Les deux conceptions alternatives rencontrées le plus fréquemment chez les élèves, la téléologie et le déterminisme génétique, ont été les plus difficiles à faire évoluer, mais la comparaison des réponses données aux questionnaires pré- et post-intervention montre tout de même des différences significatives en faveur d'une meilleure compréhension de l'effet du hasard dans l'évolution des espèces après l'enseignement. Par conséquent, afin de faciliter un changement conceptuel chez les élèves, les chercheurs proposent de concentrer l'enseignement sur le rôle du hasard et de l'imprévisibilité dans la production de nouvelles variations génétiques, c'est-à-dire sur des concepts totalement incompatibles avec la téléologie intuitive des élèves.

Bien sûr, suite à une seule intervention éducative en classe, tous les élèves n'ont pas atteint le niveau d'apprentissage souhaité par les chercheurs dans leur utilisation des concepts de l'évolution des espèces et cela démontre le besoin de revenir souvent et sur le long terme sur ces concepts complexes. Mais l'approche constructiviste, basée sur l'explication des concepts de base des différents niveaux d'organisation en génétique et sur l'importance de tenir compte de l'effet du hasard et de l'imprévisibilité de ces processus (qui ne sont pas toujours négatifs ou néfastes), montre tout de même qu'elle donne de bons résultats chez un nombre important d'élèves. En effet, ces derniers en sont venus à réaliser que toute mutation n'est pas nécessairement néfaste, qu'elle peut présenter un avantage pour un individu, et qu'en fin de compte, ce sont

les pressions de l'environnement qui détermineront l'avenir de cette mutation au sein de la population.

Les chercheurs remarquent également que plus les élèves ont accès à des informations précises tôt dans l'enseignement concernant les processus en jeu dans l'évolution des espèces, y compris le rôle du hasard, mieux ils comprennent les ramifications et les interactions entre les différents niveaux d'organisation génétique et moins les arguments téléologiques et déterministes sont avancés par eux. Les auteurs rapportent d'ailleurs que des élèves interrogés un an après l'enseignement ont considéré les informations sur le rôle du hasard et de l'imprévisibilité dans l'évolution des espèces comme l'un des principaux facteurs qui leur ont fait rejeter leurs conceptions téléologiques et remplacer leurs explications intuitives par des explications reposant sur les concepts scientifiques de l'évolution.

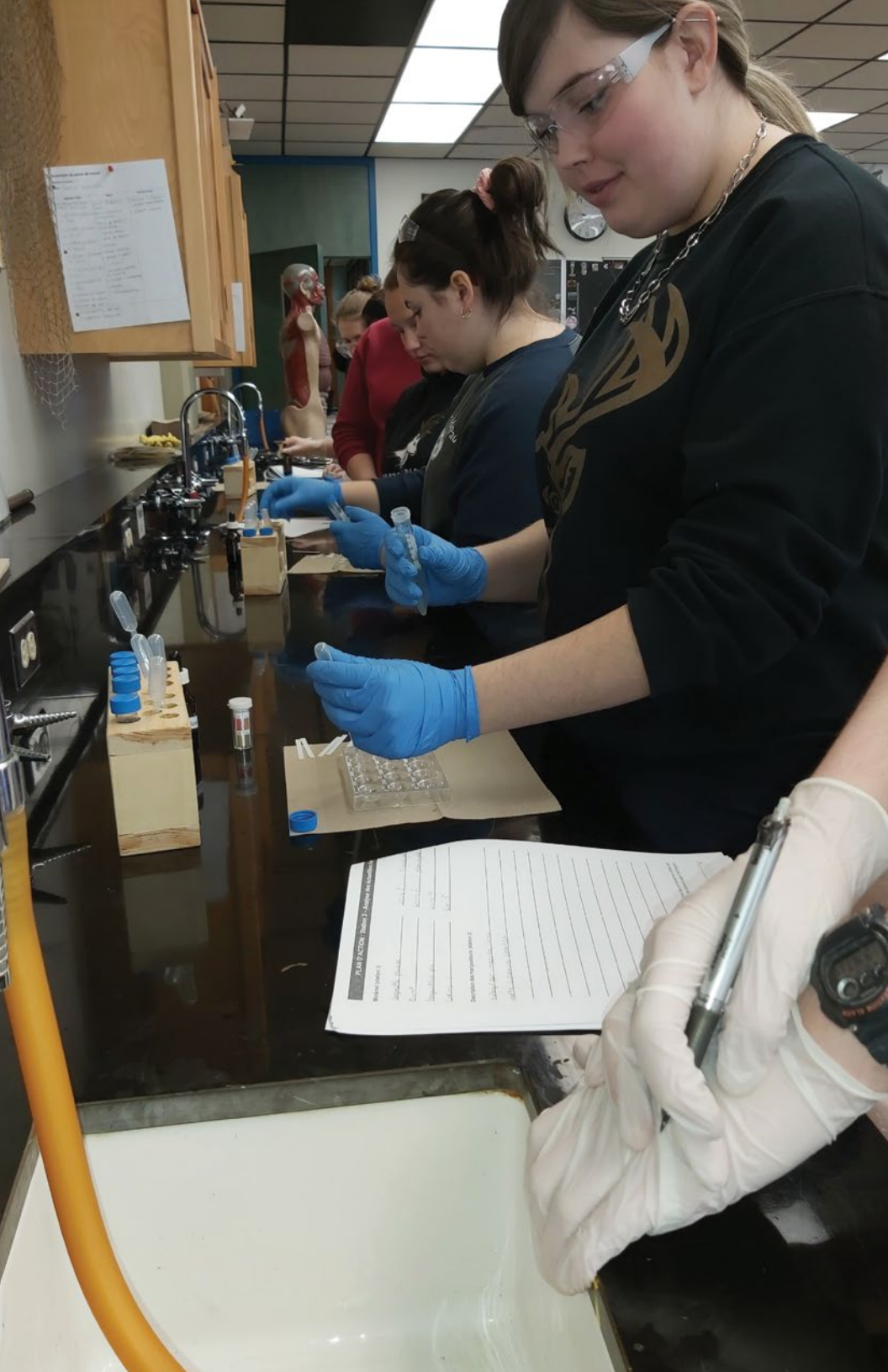
Les auteurs proposent en outre d'intervenir sur les conceptions alternatives des élèves tôt dans le cursus scolaire, avant que celles-ci ne deviennent trop ancrées dans leur esprit et, par conséquent, plus résistantes au changement. Les résultats de leur recherche démontrent qu'une telle approche peut connaître un certain succès auprès d'élèves de 14 et 15 ans, mais les auteurs signalent que des élèves plus jeunes n'ont peut-être pas la maturité suffisante pour comprendre ces concepts complexes...

Les chercheurs ont aussi remarqué que les réponses et les explications données par les élèves à certaines questions dépendaient énormément du contexte et de la formulation de la question. Les élèves manquaient donc d'une certaine cohérence dans leurs explications qui leur aurait pourtant permis de faire appel aux mêmes mécanismes génétiques pour expliquer des situations différentes. C'est un point, la

cohérence, sur lequel les chercheurs suggèrent de revenir et de valider dans le cadre de recherches futures.

Enfin, Kampourakis et Zogza (2009) insistent pour dire que les enseignantes et les enseignants et les auteurs de manuels scolaires doivent être très prudents quant aux expressions qu'ils utilisent et aux explications qu'ils fournissent sur l'origine des traits (phénotype) chez les individus. Par exemple, il ne faut pas dire aux élèves que les adaptations des espèces résultent de changements dans la structure, les fonctions ou le comportement des individus eux-mêmes, ce qui leur facilite leur survie dans un environnement particulier. En fait, il faut expliquer aux élèves pourquoi cette formulation est fautive et leur dire plutôt que les adaptations résultent de changements dans la structure, les fonctions ou le comportement des individus qui contribuent à leur survie dans un environnement particulier et que ces changements sont donc préservés au sein d'une population au moment de la reproduction grâce à la sélection naturelle.

Ben-Nun et Yarden (2009) ont suivi, en biologie moléculaire, l'évolution des modèles mentaux (conceptions alternatives) d'élèves israéliens participants à une journée d'activités dans un laboratoire situé dans un centre universitaire, mais où ce sont leurs enseignants qui mènent les expériences éducatives, et non pas des chercheurs ou des étudiants universitaires. Les enseignants avaient tous reçu une formation approfondie au préalable. Les élèves devaient résoudre le problème suivant : identifier deux échantillons d'ADN, dont l'un contenait un fragment d'ADN humain. Afin de procéder à cette identification, ils devaient concevoir leur propre protocole à l'aide de diverses techniques de génétique.



PLANT FACTORY: Science 2. Learning with Inquiry

My Partner's Name: _____

My Partner's Initials: _____

My Partner's Phone Number: _____

My Partner's Email Address: _____

My Partner's Address: _____

My Partner's City: _____

My Partner's State: _____

My Partner's Zip: _____

My Partner's Country: _____

My Partner's Date of Birth: _____

My Partner's Gender: _____

My Partner's Height: _____

My Partner's Weight: _____

My Partner's Blood Type: _____

My Partner's Eye Color: _____

My Partner's Hair Color: _____

My Partner's Hair Style: _____

My Partner's Favorite Color: _____

My Partner's Favorite Food: _____

My Partner's Favorite Sport: _____

My Partner's Favorite Music: _____

My Partner's Favorite TV Show: _____

My Partner's Favorite Movie: _____

My Partner's Favorite Book: _____

My Partner's Favorite Hobby: _____

My Partner's Favorite Animal: _____

My Partner's Favorite Plant: _____

My Partner's Favorite Flower: _____

My Partner's Favorite Fruit: _____

My Partner's Favorite Vegetable: _____

My Partner's Favorite Drink: _____

My Partner's Favorite Dessert: _____

My Partner's Favorite Season: _____

My Partner's Favorite Time of Day: _____

My Partner's Favorite Time of Year: _____

My Partner's Favorite Place: _____

My Partner's Favorite Thing: _____

Les élèves participants, âgés de 17 et 18 ans, provenaient de plusieurs classes de biologie de la fin du secondaire, une bonne partie étant en 12^e année. Leurs conceptions alternatives ont été sondées avant et après l'activité à l'aide d'un questionnaire; les chercheurs ont également filmé les élèves dans le laboratoire afin d'analyser leur discours en cours d'activité. Avant l'activité, plusieurs conceptions d'élèves se concentraient autour des représentations visuelles de l'ADN. En particulier, les élèves avaient du mal à comprendre que la molécule d'ADN est beaucoup trop petite pour être visible à l'œil nu, même avec un microscope conventionnel. D'autres s'attendaient à ce que le résultat d'une électrophorèse menée en laboratoire se présente sous la forme d'une double hélice (la structure moléculaire de l'ADN) visible à l'œil nu. Les auteurs relient l'existence de ces conceptions aux illustrations que l'on retrouve généralement dans les manuels scolaires et qui exercent une grande influence sur la construction des conceptions des élèves.

Les chercheurs ont identifié et analysé toutes les occurrences de conflit cognitif engendré par les activités de laboratoire. Combinée à la comparaison des résultats aux questionnaires pré- et post-test, cette analyse montre une nette évolution des conceptions des élèves à propos des représentations visuelles de l'ADN suite à l'activité. Les chercheurs ont par ailleurs constaté que les connaissances des élèves à propos de l'ADN et du rôle central des protéines en génétique n'ont pas changé de manière significative, probablement parce que l'activité ne traitait pas directement de ces sujets. Par contre, les élèves semblaient avoir une meilleure compréhension des méthodes utilisées en génie génétique (par exemple, l'électrophorèse sur gel) à la suite de l'activité pratique.

Une des premières tâches des chercheurs qui s'intéressent au développement de séquences d'enseignement

constructivistes optimales pour un concept scientifique en particulier est de procéder à une recension des principales conceptions alternatives présentes chez les élèves du groupe d'âge visé ; l'objectif de ce type de recension est aussi d'essayer de déterminer le raisonnement des élèves à l'origine de ces conceptions. Des travaux allant dans ce sens et concernant des conceptions en génétique ont été menés dans divers pays, entre autres par Lewis (2014), Lukša *et al.* (2016), Osman, BouJaoude et Hamdan (2017), Alfred *et al.* (2019) ainsi que Stern *et al.* (2020). Ces recensions peuvent ensuite servir au développement de questionnaires et d'inventaires de concepts visant à suivre l'évolution des conceptions des élèves suite à un enseignement spécifique.

C'est ce qu'ont fait Franke, Scharfenberg et Bogner (2013) en recensant les principales conceptions présentes chez 144 élèves bavarois de 10^e année, âgés en moyenne de 15,6 ans. Tous étaient des novices en génétique, n'ayant encore jamais reçu de formation à ce sujet. Le but principal des chercheurs était de recueillir les conceptions alternatives de ces élèves à propos du génie génétique, de les catégoriser, d'analyser la fréquence des catégories identifiées, puis de s'en servir pour concevoir un instrument diagnostique permettant de suivre l'évolution des conceptions des élèves après une séance d'enseignement. À partir de leur inventaire, les chercheurs ont donc conçu un questionnaire à choix multiples, les conceptions alternatives exprimées par les élèves servant de distracteurs (c.-à-d. des choix de réponses fausses).

Ce questionnaire a été testé dans le cadre d'une sortie dans un laboratoire de recherche où l'enseignement d'inspiration constructiviste (de type « mains-à-la-pâte ») incluait la prise en compte explicite des conceptions des apprenants. Pour cette recherche, Franke et Bogner (2011b) ont recruté 294 élèves

bavarois de 10^e année (âgés en moyenne de 16,1 ans). Les chercheurs les ont divisés en trois groupes : deux groupes traitement et un groupe témoin. Le premier groupe traitement était confronté explicitement aux conceptions alternatives fréquentes liées au génie génétique et le second ne l'était pas ; ces deux groupes ont, d'autre part, reçu le même enseignement. Quant au groupe témoin, il n'a reçu aucun enseignement en génétique, mais a aussi répondu au questionnaire. En lien avec des activités de laboratoire consacrées à diverses expériences en génie génétique, les élèves des deux groupes traitement ont répondu au questionnaire de Franke, Scharfenberg et Bogner (2013) à propos de leurs conceptions à trois reprises : avant l'activité, tout de suite après et six semaines plus tard ; le groupe témoin a répondu seulement au prétest et au post-test avec délai (six semaines plus tard).

Les résultats indiquent que les élèves du premier groupe traitement (prise en compte de leurs conceptions alternatives) expriment significativement moins de conceptions alternatives et mettent davantage de concepts scientifiques en avant après la séance de laboratoire que ceux du second groupe traitement qui n'ont pas été confrontés à leurs conceptions alternatives, et que ces gains se maintiennent jusqu'à six semaines après l'activité, quoiqu'avec une légère baisse. Les réponses du groupe témoin n'ont pas différé significativement au cours de l'étude. Une différence entre les garçons et les filles est apparue : à court terme, plus de garçons ont vu leurs conceptions évoluer vers les concepts scientifiques, tandis que les filles ont vu leurs changements de conceptions durer davantage dans le temps, et ce, indépendamment du groupe dont elles faisaient partie. Ces résultats amènent les auteurs à conclure que les activités de laboratoire de type « mains-à-la-pâte » seules ne semblent pas suffisantes pour faire évoluer les conceptions des élèves et

qu'il faut aussi y greffer une prise en compte explicite de leurs conceptions alternatives. Les auteurs ajoutent aussi qu'il vaut la peine d'explorer les différences de réactions des garçons et des filles face à un enseignement faisant un usage explicite des conceptions des élèves, puisque des facteurs psychologiques liés au genre entrent peut-être en ligne de compte.

Franke et Bogner (2011a) ont réutilisé la même approche expérimentale que celle décrite ci-dessus (voir Franke et Bogner, 2011b), mais cette fois-ci pour étudier l'effet d'un enseignement constructiviste de type « mains-à-la-pâte », incluant la prise en compte des conceptions des élèves, sur leurs apprentissages, sur l'effort mental déployé par les élèves participants, ainsi que sur l'efficacité de l'enseignement. Au total, 293 élèves bavarois de 10^e année (âgés en moyenne de 16,1 ans) ont participé à la recherche. Comme pour l'étude de Franke et Bogner (2011b), les élèves ont été répartis en trois groupes : deux groupes traitement (séance de laboratoire avec ou sans explication des conceptions) et un groupe témoin (sans enseignement). Pour la présente étude, les chercheurs ont mesuré les apprentissages des élèves à trois reprises (prétest, post-test après la journée au laboratoire et post-test avec délai six semaines plus tard) à l'aide d'un questionnaire développé pour l'occasion ; les élèves ont également été invités à estimer leur effort mental à quatre moments de la journée passée au laboratoire et, finalement, ces deux mesures ont été combinées pour estimer l'efficacité pédagogique de la séance d'enseignement au laboratoire.

Les résultats de l'analyse montrent que les élèves des deux groupes traitement (séance de laboratoire avec ou sans explication des conceptions) ont vu leurs apprentissages augmenter suite à la séance, mais diminuer au bout de six semaines. Les niveaux d'apprentissage du groupe témoin (sans enseignement) n'ont pas changé significativement. Les

chercheurs ont par contre découvert une différence significative et positive entre les gains d'apprentissage du groupe traitement avec prise en compte des conceptions et ceux de l'autre groupe traitement (sans prise en compte des conceptions), avec une taille d'effet moyenne. Cette différence a toutefois disparu six semaines plus tard.

En ce qui concerne l'effort mental déployé par les élèves dans les deux groupes traitement, une différence significative, bien que faible, est apparue, mais uniquement durant la dernière phase de l'activité de laboratoire (interprétation des résultats), indiquant que les élèves du groupe sans prise en compte des conceptions avaient dû déployer un effort plus important à ce moment crucial de la séance. À court terme, cette séance de laboratoire s'est donc révélée plus efficace pour le groupe avec prise en compte des conceptions, que ce soit durant la phase d'expérimentation ou la phase d'interprétation des résultats ; à moyen terme, cela était vrai seulement pour la phase d'interprétation. Il semble donc que la prise en compte explicite des conceptions des élèves en génétique, dans le cadre d'une activité en laboratoire, leur permet d'atteindre les objectifs d'apprentissage visés tout en déployant un effort mental moindre, ou encore d'atteindre des objectifs plus élevés avec un effort mental plus soutenu. Dans les deux cas, l'explicitation des conceptions des élèves semble servir de base à l'évolution de leurs conceptions premières.

Franke et Bogner (2013) se sont aussi intéressés à l'impact qu'un enseignement constructiviste de type « mains-à-la-pâte », confrontant de manière explicite les élèves à leurs propres conceptions et à celles de leurs pairs (voir Franke et Bogner, 2011 a et 2011b), aurait sur leurs apprentissages en génétique, mais aussi sur leur niveau d'intérêt envers cette science, leur bien-être et leur niveau d'anxiété. Selon Treagust et Duit (2008),

ces composantes émotionnelles jouent un rôle important dans l'enseignement des sciences basé sur l'approche du changement conceptuel. Franke et Bogner (2013) se sont aussi penchés sur les différences de genre par rapport à ces construits psychologiques. Les 291 participants étaient des élèves de 10^e année (âgés en moyenne de 16,1 ans) et ils ont étudié le contenu habituel du programme scolaire de Bavière, en particulier les notions liées au génie génétique et aux avantages et risques associés. Ils ont été répartis en deux groupes, l'un a été confronté à des conceptions alternatives, et l'autre, non. Il n'y avait pas de groupe témoin dans cette étude. Comme pour les autres recherches menées par cette équipe, les élèves ont travaillé dans un laboratoire de recherche situé hors des murs de l'école. La journée entière qu'ils y ont passée a été consacrée à diverses expériences en génie génétique (extraction et séquençage de l'ADN, par exemple).

Les données ont été recueillies à l'aide de questionnaires mesurant l'émotion, l'intérêt, le bien-être et l'anxiété, tous utilisant une échelle de Likert¹ à cinq niveaux, tandis qu'un questionnaire à choix multiples (différent de celui utilisé par Franke et Bogner, 2011b) a servi à mesurer les apprentissages des élèves. Il s'avère que le groupe traitement confronté aux conceptions alternatives a développé un niveau d'intérêt et de bien-être significativement plus élevé que le second groupe traitement, tandis que le niveau d'anxiété demeurait bas pour les deux groupes. Cet intérêt s'est aussi maintenu jusqu'à cinq semaines après la fin de l'étude. En d'autres termes, ces élèves se sentaient à l'aise et en sécurité dans le laboratoire, deux

1. Une échelle de Likert est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez un individu. Elle consiste en une série d'affirmations pour lesquelles la personne interrogée doit exprimer son degré d'accord ou de désaccord.

facteurs importants pour promouvoir leurs apprentissages. Au niveau de la différence entre les filles et les garçons, seuls les scores de bien-être ont montré une différence, les garçons se sentant mieux dans le laboratoire que les filles. Les résultats suggèrent également une influence positive de l'intérêt et du bien-être sur les apprentissages : les élèves qui se sont sentis bien au cours des expériences au laboratoire et qui ont manifesté le plus d'intérêt ont obtenu des gains d'apprentissage significativement plus élevés que les autres.

Travaillant directement dans les classes d'informatique des écoles où ils sont intervenus (et non plus en laboratoire comme les études décrites ci-dessus), Poehnl et Bogner (2013) se sont demandé quel impact aurait un enseignement explicitement basé sur les conceptions alternatives des élèves sur leur effort mental (charge cognitive) lors de l'apprentissage de concepts scientifiques liés à la production de l'insuline par bio-ingénierie. À cette fin, ils ont recruté 398 élèves bavarois de 9^e année (âgés en moyenne de 14,9 ans) et les ont répartis dans quatre groupes traitement. Deux groupes ont étudié les concepts en génie génétique à l'aide d'une présentation hypermédia sur un ordinateur, tandis que les deux autres les ont étudiés à l'aide d'un manuel scolaire. Dans chacun de ces groupes traitement, la moitié des élèves suivaient un enseignement qui mettait en évidence les conceptions alternatives en génétique et l'autre moitié, non. Un cinquième groupe d'élèves (témoin) n'a suivi aucun enseignement relatif au génie génétique au cours de l'étude. Les élèves qui ont suivi un enseignement basé sur les conceptions alternatives (avec l'ordinateur ou le manuel) y ont été confrontés à huit reprises durant les leçons par l'intermédiaire de textes présentant à la fois les conceptions alternatives et les concepts scientifiques, mais il ne s'agissait pas de textes de réfutation au sens de Mikkilä-Erdmann (2001), c'est-à-dire

des textes qui tentent systématiquement de mettre en évidence les différences entre les conceptions alternatives et les concepts scientifiques.

L'effort mental des élèves a été mesuré à divers moments de la leçon, tandis que le nombre de conceptions exprimées par les élèves a fait l'objet de trois recensions utilisant l'instrument développé par Franke et Bogner (2011b) et Franke, Scharfenberg et Bogner (2013) : avant, après la leçon, puis six semaines plus tard. L'analyse des résultats montre que les élèves des groupes qui ont reçu un enseignement ne tenant pas compte de leurs conceptions ont connu une augmentation nettement plus importante à court et à moyen terme du nombre de concepts scientifiques appris. Pour les élèves qui ont été confrontés à leurs conceptions premières, il semble que cela ait représenté une surcharge cognitive qui a nui à leurs apprentissages. L'explicitation des conceptions de ces élèves, mais sans suivi spécifique au point de vue du changement conceptuel, semble donc avoir eu des effets négatifs sur leur réussite en termes d'apprentissage de concepts scientifiques. Autrement dit, pour ces élèves, l'effort mental investi n'a pas mené à de meilleurs apprentissages. Ces résultats suggèrent à quel point il est important d'aller au-delà de la seule explicitation des conceptions premières des élèves si l'on veut que le processus de changement conceptuel soit efficace.

Pekel et Hasenekoğlu (2015) ont comparé deux méthodes d'enseignement, un enseignement plutôt traditionnel (groupe témoin) et un enseignement inspiré de la théorie du changement conceptuel de Posner *et al.* (1982) (groupe traitement), afin d'étudier les apprentissages en génétique de 52 élèves turcs de 10^e année. L'enseignement, qui portait sur les gènes, les chromosomes et l'ADN, et qui a été assuré pour les deux groupes par le même professeur, a duré quatre semaines à

raison de quatre leçons de 40 minutes par semaine. Les chercheurs ont utilisé deux questionnaires, l'un pour évaluer les apprentissages des élèves en génétique, l'autre pour mesurer leur attitude envers la biologie ; les deux questionnaires ont été remplis avant, puis après la séquence d'enseignement. Dans le cadre de cette approche pédagogique visant le changement conceptuel, la personne enseignante a pris en compte les conceptions premières des élèves (Posner *et al.*, 1982) et a utilisé divers moyens (dont les textes de réfutation, voir Tippett, 2010) pour en faciliter l'évolution. Les résultats montrent que les élèves du groupe traitement ont non seulement appris davantage que ceux du groupe témoin, mais qu'en plus leur attitude envers la biologie s'est grandement améliorée.



Stratégies d'enseignement en génétique

Dans la plupart des programmes scolaires à travers le monde, l'enseignement de concepts en génétique est délivré au secondaire, souvent vers la fin du cycle, puisque l'on considère que ce n'est qu'à ce moment de leur scolarité que les élèves possèdent la maturité et les outils intellectuels nécessaires pour entreprendre l'étude de cette matière complexe et exigeante (voir, par exemple, NRC, 1996). Mais l'on constate que cet enseignement ne permet généralement pas aux élèves de maîtriser les notions de base de la génétique avant la fin de leurs études secondaires (Kurth et Roseman, 2001). Dans ce qui suit, nous présentons des études comparatives ou des études de cas avec intervention qui ont cherché à déterminer les meilleures stratégies et approches éducatives à appliquer pour favoriser les apprentissages des élèves du secondaire en génétique.

Dans une étude de cas menée en Norvège auprès de deux classes de 10^e année (50 élèves au total, âgés de 15 et 16 ans), Furberg et Arnseth (2009) se sont intéressés à la façon dont les élèves se sont approprié les ressources mises à leur disposition dans le cadre d'une activité collaborative de résolution de problèmes en génétique. La recherche portait également sur le rôle de l'enseignant dans la classe, sur la teneur des conversations tenues entre les élèves au sein des équipes et sur l'influence des pratiques institutionnelles (scolaires) sur leurs apprentissages en génétique. Les chercheurs ont organisé une série d'activités à la suite de l'utilisation par les élèves d'une plateforme d'apprentissage intitulée *viten.no*. Cette plateforme offre des ressources d'apprentissage en sciences en ligne à des élèves du secondaire. Par équipe de quatre, les élèves devaient répondre à plusieurs questions, dont la première était : « Quelle est la relation entre

l'ADN, les gènes, les acides aminés et les protéines ? Dessinez et expliquez votre réponse en utilisant vos propres mots.»

Grâce à l'analyse du discours et des interactions des élèves entre eux au cours des deux heures qu'a duré la série d'activités, et à celle des illustrations et autres productions réalisées lors des discussions, les auteurs notent l'importance des ressources mises à la disposition des élèves (en quantité suffisante et au moment opportun), du guidage et des conseils avisés de l'enseignant, qui doit aider les élèves en cas de blocages, mais sans leur donner de réponses toutes faites, ainsi que des habitudes d'interaction sociale de chaque élève qui, dans une situation scolaire, peut être tenté « d'avoir raison » vis-à-vis de ses pairs, plutôt que d'essayer d'en arriver à un consensus basé sur des arguments scientifiques. Les auteurs insistent également sur l'importance de maîtriser la langue et le vocabulaire de la génétique, soulignant que « *when students did not master the language of genetics to account and explain to one another, their discussion got stalled* » (p. 185).

À propos de la façon dont les élèves ont mené leur argumentation, les auteurs remarquent qu'au début, leur objectif était clairement d'utiliser correctement les concepts scientifiques comme points d'appui pour les arguments, mais qu'ensuite, les arguments sont devenus moins scientifiques, plus personnels, et « avoir raison sur les autres » semblait être devenu l'objectif. Vers la fin, l'objectif de la discussion s'est à nouveau transformé devenant : « comment répondre au devoir que nous devons rendre bientôt... », une préoccupation beaucoup plus « scolaire » que scientifique. De ce point de vue, les aspects purement scolaires de la tâche (contraintes de temps et de ressources, organisation de la classe, relation enseignant-élèves, etc.) ont semblé jouer un plus grand rôle dans les discussions des élèves et leur production finale que les aspects purement

scientifiques et épistémologiques de construction de sens face à des concepts scientifiques complexes. En d'autres termes, les aspects interactionnels et institutionnels de la situation d'enseignement-apprentissage scolaire ont peut-être influencé davantage la construction de sens et les apprentissages des élèves en génétique que les aspects épistémologiques.

Yilmaz, Tekkaya et Sungur (2011) ont comparé trois stratégies d'enseignement en génétique auprès de 81 élèves turcs de 8^e année (âgés en moyenne de 13,1 ans), répartis en trois groupes : un premier a reçu un enseignement de type traditionnel, tandis que les deux autres ont soit lu des textes de réfutation (Diakidoy, Kendeou et Ioannides, 2003 ; Guzzetti, 2000 ; Mikkilä-Erdmann, 2001), soit suivi un cycle d'apprentissage (exploration, conceptualisation et application) basé sur des discussions entre élèves et enseignant (Karplus, 1977 ; Stepan, Dyche et Beiswinger, 1988). Dans les deux cas, l'enseignement portait sur la génétique mendélienne, la terminologie génétique, la transmission des traits (carrés de Punnett) et la génétique humaine. L'enseignement traditionnel a majoritairement suivi le contenu du manuel scolaire présenté par l'enseignant.

Les chercheurs ont utilisé un questionnaire prétest et post-test pour évaluer les apprentissages des élèves avant et après la leçon, puis un autre un mois plus tard (post-test avec délai). L'analyse des résultats montre que les élèves à qui l'on a enseigné à l'aide des textes de réfutation ou en utilisant le cycle d'apprentissage ont réalisé des gains d'apprentissage significativement plus élevés que le groupe qui a reçu un enseignement traditionnel ; par contre, il n'est pas apparu de différence significative entre ces deux groupes traitement. Les stratégies éducatives qui utilisent les textes de réfutation ou le cycle d'apprentissage, où l'on donne aux élèves l'occasion de tester leurs propres idées, de travailler en équipe et de s'impliquer mentalement et physiquement dans

leurs apprentissages, semblent donc plus efficaces qu'un enseignement traditionnel, centré sur le professeur, le contenu à enseigner et le manuel scolaire. Cela dit, les auteurs constatent tout de même que des difficultés conceptuelles persistent lorsque les élèves doivent résoudre des problèmes qui font intervenir plusieurs niveaux d'organisation génétique, comme le rôle des gènes et des allèles dans le modèle mendélien.

Notons que Al khawaldeh (2013) a reproduit très exactement l'étude de Yilmaz, Tekkaya et Sungur (2011) décrite ci-dessus, cette fois avec 112 élèves jordaniens de 10^e année (âgés en moyenne de 15,2 ans) et qu'il est arrivé exactement aux mêmes conclusions.

Walan et Rundgren (2015) ont proposé à 105 élèves suédois de 15 ans environ une activité de type CSI (*Crime scene investigation*) associée à une approche éducative en trois temps : contextualisation (scénario de la scène de crime), décontextualisation (enquête en laboratoire de génétique) et recontextualisation (prise de décision par rapport au résultat de l'enquête et argumentation). Pour résoudre le crime, les élèves recevaient des échantillons d'ADN et devaient les analyser afin de découvrir le coupable. L'activité, d'une durée de trois heures, a été menée dans un laboratoire universitaire bien équipé. Les chercheuses ont mis au point cette activité, car des études antérieures ont montré qu'il est possible d'accroître l'intérêt des élèves grâce à un enseignement fondé sur un contexte ou sur une enquête stimulante (Kennedy, 2013 ; Parchmann *et al.*, 2006). L'objectif d'une telle stratégie hautement contextualisée pour l'enseignement de la science est de réduire l'écart de perception des élèves entre les apprentissages effectués à l'école et leur utilité dans la vie quotidienne ; en d'autres termes, on souhaite rendre l'enseignement de la science plus pertinent. Cet enseignement a été comparé, pour les mêmes concepts en génétique, à un enseignement de

type traditionnel. Les chercheuses ont aussi demandé aux élèves d'imaginer ce que serait pour eux un cours de science idéal.

Un questionnaire mesurant divers construits affectifs (motivation, intérêt, perception d'utilité, etc.) sur une échelle de Likert à sept niveaux a été utilisée à deux reprises. Avant l'activité, les élèves devaient le remplir en pensant à leurs cours de science traditionnels, puis en imaginant un cours de science idéal. Après l'activité, les élèves étaient invités à répondre aux mêmes questions, mais à propos de l'expérience de type CSI qu'il venait de vivre en laboratoire. Les résultats montrent que le module de type CSI, réalisé dans le cadre d'une sortie scolaire dans un laboratoire scientifique, a suscité chez les élèves des réactions affectives significativement plus positives que les cours de science traditionnels, sauf en ce qui a trait à l'impact de la science dans leur vie quotidienne. La comparaison entre le module CSI et un cours de science idéal n'a pas mis en évidence de différence significative en termes de construits affectifs, à l'exception de la perception par les élèves de l'utilité des sciences dans la société. Pour cet élément, le module CSI s'est avéré supérieur au cours idéal.

Les notes de terrain prises par la première auteure ont révélé une conséquence inattendue de l'approche CSI : certains élèves en ont profité pour poser des questions sur les programmes de formation et les emplois liés à l'analyse médico-légale. Ainsi, la dimension professionnelle du travail médico-légal a été découverte par les élèves et a suscité leur intérêt. Les auteures ajoutent qu'au cours de leurs nombreuses recherches avec des enseignants en exercice, ces derniers avaient très souvent mentionné qu'une approche d'enseignement basée sur la contextualisation ou une enquête demandait trop de temps, ou encore qu'il était difficile de combiner les deux approches. Pourtant, grâce à leur étude, les chercheuses estiment avoir démontré la possibilité de déployer

une stratégie d'enseignement incluant à la fois un contexte et une enquête, et ce, dans un laps de temps raisonnable.

Susantini *et al.* (2018) ont cherché à comparer deux stratégies éducatives distinctes pour l'enseignement de concepts en génétique auprès d'élèves indonésiens de 12^e année (âgés de 17 et 18 ans) : une stratégie métacognitive seule et une stratégie métacognitive liée à un apprentissage coopératif. Dans leur étude, les auteurs définissent la métacognition comme une stratégie régulée par l'élève lui-même et qui l'encourage à utiliser des connaissances déclaratoires, procédurales et conditionnelles afin d'atteindre ses objectifs d'apprentissages. Quant à l'apprentissage coopératif, il invite chaque élève à identifier ses forces et ses faiblesses et à s'allier avec d'autres aux caractéristiques complémentaires aux siennes. Les sujets abordés en classe durant l'étude couvraient quatre thèmes différents en matière de génétique : la nature des gènes et du matériel génétique, les mécanismes de l'héritage génétique, l'héritage génétique chez l'humain et les mutations.

Les résultats montrent que le groupe coopératif présentait des aptitudes de collaboration plus élevées, mais des capacités métacognitives plus faibles que le groupe utilisant la métacognition seule. Cependant, les deux stratégies d'enseignement ne semblent pas avoir eu d'influence sur d'autres construits, comme l'amélioration de l'apprentissage en génétique et les résultats scolaires. En outre, les performances métacognitives et les connaissances en génétique des meilleurs élèves étaient supérieures à celles des élèves moins performants.

Dans une étude impliquant 113 élèves nigériens de 3^e année du secondaire, Okoye et Okechukwu (2010) ont comparé trois approches éducatives visant l'apprentissage de divers

concepts en génétique (transmission des traits, chromosomes, hérédité, etc.) : la carte conceptuelle, la résolution de problèmes et l'enseignement traditionnel. Les chercheurs ont aussi voulu savoir s'il y avait parmi les élèves participants des différences entre les garçons et les filles en termes d'apprentissage, et ce, pour chacune des trois stratégies. La comparaison des résultats à la suite d'un pré- et d'un post-test a montré un net avantage des approches utilisant la carte conceptuelle et les activités de résolution de problèmes par rapport à l'enseignement traditionnel, mais sans différence significative entre les apprentissages des garçons et des filles. Les auteurs ne disent malheureusement rien à propos de possibles différences de gains entre l'enseignement utilisant la carte conceptuelle et celui faisant appel à la résolution de problèmes. Dans le contexte particulier de l'enseignement des sciences dans les écoles secondaires du Nigéria, ces résultats les amènent tout de même à proposer de repenser la formation des maîtres afin d'introduire davantage de pratiques actives dans l'enseignement des sciences en classe.

Güccük et Köksal (2017) ont utilisé une méthode d'enseignement par étude de cas (*case teaching*, à ne pas confondre avec *case study*, qui est plus une méthode de recherche) qui fournit aux apprenants une riche description d'une situation donnée en lien avec le génie génétique, mais sans analyse ni conclusion. Le travail des élèves consiste donc à analyser la situation, à expliquer les relations entre les divers éléments de la situation à l'étude, à identifier les différentes options disponibles pour résoudre le problème, à les évaluer et à prédire les effets de différentes réponses possibles. C'est ce travail d'analyse qui devrait mener les élèves jusqu'aux apprentissages visés. Dans leur étude, réalisée en Turquie, les chercheurs ont soumis aux élèves trois cas en lien avec le

génie génétique (par exemple, l'utilisation de semences OGM pour la culture des tomates). Les 63 élèves de 8^e année participants ont été répartis en deux groupes de taille similaire. Les élèves du groupe traitement ont étudié les concepts en génie génétique par le biais d'une des trois études de cas, tandis que les élèves du groupe témoin ont étudié les mêmes concepts de manière traditionnelle. L'enseignement a duré, pour chacun des groupes environ deux heures par semaine pendant trois semaines.

Les chercheurs ont évalué, avant et après l'enseignement, le niveau d'apprentissage et l'assimilation des concepts des deux groupes à l'aide d'un questionnaire et d'une carte conceptuelle créée par les élèves. Le questionnaire a été rempli une fois de plus trois semaines après la fin de l'enseignement pour mesurer la rétention à moyen terme. Les résultats de l'analyse montrent que les élèves qui ont étudié à l'aide des cas en génie génétique ont obtenu des scores significativement meilleurs au post-test et au post-test avec délai que les élèves du groupe témoin. Leurs apprentissages semblent aussi avoir perduré, puisque la différence entre le post-test et le post-test avec délai n'est pas significative pour le groupe traitement. Il n'en va pas de même pour le groupe témoin, dont le score au post-test avec délai a diminué par rapport à celui du post-test. De plus, les cartes conceptuelles dessinées en post-test par les élèves du groupe traitement contenaient le même nombre de concepts que celles des élèves du groupe témoin, mais possédaient significativement plus de liens entre les concepts ; la configuration de leurs cartes conceptuelles avait également évolué après l'enseignement, puisqu'elles présentaient là aussi plus de connexions entre les concepts. Il semble donc que l'enseignement par étude de cas, qui oblige les élèves à utiliser

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

divers concepts scientifiques et à les articuler de manière pratique et cohérente pour trouver une solution au problème posé, est une approche efficace pour l'enseignement de notions en génie génétique.



Libre choix des élèves dans l'apprentissage de la génétique

Eilam et Reiter (2014) ont voulu comparer deux groupes d'élèves étudiant les mêmes concepts en génétique, mais selon deux modalités éducatives distinctes : un groupe témoin suivant un enseignement plutôt traditionnel, prodigué par l'enseignant, et un groupe traitement s'appuyant sur les principes de l'apprentissage autorégulé. Le même enseignant était responsable des deux groupes. De plus, les deux groupes ont utilisé le même manuel, étudié les mêmes concepts selon le même échancier et ont été soumis aux mêmes évaluations. La comparaison a duré toute une année scolaire. Les concepts à l'étude étaient la structure de la cellule, y compris son noyau, les lois de Mendel et les lois de probabilité liées à la génétique.

Cinquante-deux élèves israéliens de 9^e année (âgés de 15 et 16 ans) ont été répartis dans les deux groupes, traitement et témoin. Toutes les activités du groupe témoin étaient dirigées par leur professeur. Dans le groupe traitement, les élèves choisissaient individuellement leur rythme d'apprentissage et avec qui ils travaillaient, fixaient leurs propres objectifs et mettaient en place les moyens de les atteindre, tout en évaluant leur performance régulièrement et en s'ajustant au besoin. Tous les élèves avaient aussi accès à une classe-laboratoire : ceux du groupe autorégulé s'y rendaient en fonction de ce qu'ils décidaient eux-mêmes, contrairement à ceux de l'autre groupe dont les séances de travail en laboratoire étaient décidées par leur enseignant.

Utilisant un formulaire autorapporté à plusieurs reprises au cours de l'année scolaire, les élèves du groupe traitement ont montré une augmentation significativement plus importante du nombre de stratégies d'étude mises en place par rapport à ceux du groupe témoin. Les élèves autorégulés ont également

dépassé ceux de l'autre groupe en termes d'apprentissage en génétique. Les auteurs notent toutefois que mettre en place un tel processus d'apprentissage autorégulé prend du temps, surtout parce que les élèves sont habitués à suivre les directives de leur enseignant et qu'il s'agit donc d'une pratique longue à changer. Par contre, un des bénéfices les plus importants de l'apprentissage autorégulé est certainement de permettre à chaque élève de découvrir quel genre d'apprenant il est et, ainsi, de mieux réguler ses apprentissages pour tirer profit de ses forces et de ses habiletés intrinsèques.

Granbom (2016) a lui aussi cherché à évaluer, pour un cours de biologie – en particulier un cours concernant l'étude de concepts en génie génétique –, l'impact sur les apprentissages de ses élèves d'une approche éducative leur laissant une plus grande responsabilité dans le choix des méthodes d'enseignement et d'évaluation. Cent vingt élèves suédois, âgés en moyenne de 17 ans, ont participé à l'étude. Après une discussion entre eux pour établir les méthodes d'enseignement et d'évaluation qu'ils privilégient pour atteindre les objectifs fixés par l'enseignant, il a été convenu que l'enseignement serait magistral, mais seulement en partie puisqu'il inclurait également des expériences en laboratoire, des sorties éducatives, des recherches personnelles, des débats, des interventions de conférenciers invités, le visionnement de films et la participation à un forum de discussion en ligne. Quant à l'évaluation faite par l'enseignant, les élèves ont préféré qu'elle soit orale plutôt qu'écrite. Granbom (2016) a ensuite comparé les apprentissages en génie génétique réalisés par ses élèves à ceux qu'ils avaient effectués dans d'autres domaines en biologie, domaines enseignés de manière plus traditionnelle. Les résultats montrent que l'approche éducative confiant plus de responsabilités aux élèves a mené à des gains d'apprentissage plus importants que l'enseignement traditionnel. Selon l'auteur,

ces résultats sont dus au fait que les élèves qui ont eux-mêmes choisi le mode d'enseignement suivi ont eu plus d'occasions de réfléchir à leurs apprentissages (métacognition), de recevoir de la rétroaction et d'évaluer leur propre compréhension des concepts en génie génétique.

Activités de résolution de problèmes en génétique

La génétique mendélienne constitue l'un des points d'entrée le plus souvent utilisés pour initier les élèves du secondaire à la génétique, en particulier lorsque l'enseignement cherche à contextualiser les apprentissages par le biais de capsules et de rappels historiques. De plus, la génétique dite « classique », qui cherche à calculer la probabilité de voir apparaître certains traits chez un individu en se basant sur le génotype de ses parents, se prête bien à des approches éducatives par résolution de problèmes et à l'établissement de liens avec les mathématiques.

Par exemple, Mihalca *et al.* (2011) ont utilisé une plateforme informatique présentant à des élèves du secondaire (âgés en moyenne de 15,2 ans) et des étudiants plus âgés du collégial des problèmes liés à l'hérédité et à la transmission des traits entre deux ou trois générations d'une même famille (couleur des cheveux, forme du menton, etc.). La plateforme proposait des problèmes à résoudre selon cinq niveaux de difficulté, mais aussi selon trois niveaux de soutien aux élèves (étayage). Trois types d'interventions ont été testées : mode non adaptatif (c.-à-d. l'ordre d'apparition des problèmes est déterminé au hasard), mode contrôlé par l'apprenant (c.-à-d. l'élève choisit le prochain problème à résoudre) et mode adaptatif (c.-à-d. le programme informatique choisit le prochain problème en fonction des réponses données par l'élève aux problèmes précédents).

En comparant les résultats d'un prétest à ceux d'un post-test évaluant les connaissances des élèves à propos du mécanisme de l'hérédité, les chercheurs constatent que le mode adaptatif entraîne une meilleure performance en matière de formation, mais au coût d'une formation de plus longue durée (c.-à-d. qu'il faut plus de temps aux élèves pour résoudre les problèmes). Malheureusement, l'efficacité accrue de la formation dans le cadre du mode adaptatif ne se traduit pas par une meilleure performance au post-test ou au test de transfert lointain (résolution de problèmes structurellement différents de ceux qui ont été étudiés et où l'élève doit montrer sa capacité à appliquer à de nouvelles situations d'apprentissage les procédures apprises en résolvant les problèmes précédents). D'autre part, les auteurs rapportent que les étudiants de niveau collégial réussissent mieux que les élèves du secondaire, mais sans préciser si cela résulte d'un niveau de connaissances plus élevé ou simplement de leur plus grande maturité, puisqu'ils sont en moyenne cinq ans plus vieux que les élèves du secondaire qui ont participé à l'étude et qu'ils ont déjà étudié la génétique auparavant. Les résultats montrent tout de même qu'en génétique, adapter une formation par résolution de problèmes aux besoins individuels et aux connaissances antérieures des apprenants (niveau de difficulté et étayage basés sur les réponses précédentes) peut mener à de meilleurs apprentissages.

Nugteren *et al.* (2018) se sont eux aussi intéressés aux stratégies déployées par des élèves du secondaire étudiant des concepts en génétique mendélienne par résolution de problèmes dans le cadre d'une activité d'apprentissage libre (c.-à-d. non guidée par un enseignant). Les participants devaient déterminer des génotypes, soit l'expression d'un trait particulier à partir des caractéristiques des parents, telles que

la couleur des yeux, le type de cheveux, etc. Pour chaque problème à résoudre, il fallait dresser un arbre généalogique, calculer un carré de Punnett et sélectionner une réponse parmi un choix de réponses multiples. Devant un écran d'ordinateur, les élèves devaient choisir huit problèmes à résoudre dans un tableau en comprenant 75 (similaire à celui utilisé par Mihalca *et al.*, 2011), chacun présentant un niveau de difficulté et d'étayage particulier (indiqués par sa position dans le tableau, par le code de couleur utilisé, etc.). Les chercheurs étaient intéressés par les options considérées par les élèves et par les raisons qui les avaient amenés à choisir un problème plutôt qu'un autre. Par exemple, est-ce que les élèves ont sélectionné les problèmes en fonction du niveau de difficulté et d'étayage offert? Ou en se fiant à la perception qu'ils avaient de leurs propres capacités à résoudre des problèmes en génétique?

Les chercheurs ont recruté 15 élèves hollandais, âgés en moyenne de 13,9 ans, par le biais d'une annonce; il s'agissait donc d'une activité extrascolaire. Les chercheurs ont demandé aux participants d'expliquer la raison de leur choix pour chacun des huit problèmes résolus, en plus d'estimer leur performance, l'effort mental déployé et de prédire la facilité avec laquelle ils allaient réussir à résoudre le prochain problème. Les chercheurs ont aussi utilisé la technique du suivi oculaire (*eye-tracking*) afin de déterminer quels problèmes faisaient l'objet de la plus grande attention au moment du choix par les élèves. Il n'y avait pas de limite de temps, mais la plupart des participants ont résolu leurs huit problèmes sur papier en un peu plus d'une heure.

Il s'avère que la majorité des élèves ont basé leur sélection sur le contenu du problème à résoudre (couleur des yeux, maladie génétique, etc.) et non pas sur le niveau de difficulté ou d'étayage offert. De plus, ils ont majoritairement surestimé leur

performance, ce qui les a amenés à choisir des problèmes plus difficiles ou offrant moins d'étayage que ceux qu'ils étaient capables de résoudre, surtout au début. Cela suggère que la capacité des élèves à s'évaluer dans le cadre d'une activité d'apprentissage libre, et donc à sélectionner un niveau de difficulté optimal pour les problèmes à résoudre, est faible. Ces constats conduisent les auteurs à conclure que les élèves du secondaire ont besoin d'être guidés et de recevoir de la rétroaction pour mieux estimer leurs propres performances et choisir des problèmes qui feront progresser leurs apprentissages de manière optimale.

Toh et Kapur (2017) ont cherché à savoir si le fait de demander à des élèves de résoudre des problèmes complexes en génétique portant sur les croisements monohybrides sans qu'ils possèdent la moindre connaissance préalable à ce sujet, ce qui les fera presque nécessairement échouer à trouver des solutions aux problèmes (ce que Kapur (2012) a appelé des « *productive failures* ») pourrait se traduire par une meilleure compréhension des concepts abordés dans les problèmes lors d'un enseignement ultérieur. C'était la première fois que le concept de *productive failures* était appliqué à un domaine autre que les mathématiques, domaine pour lequel il a été spécifiquement développé.

Les chercheurs ont formé deux groupes, qui ont participé à deux expériences distinctes, réunissant un total de 144 élèves singapouriens de 9^e année (âgés de 14 et 15 ans). Au cours de la première expérience, les élèves d'un premier groupe ont bénéficié, avant la phase de résolution de problèmes, d'un enseignement minimal à propos des croisements monohybrides, tandis que ceux de l'autre groupe n'ont reçu aucun enseignement. Comme on s'y attendait, les résultats suggèrent que les élèves qui n'ont pas disposé de connaissances préalables ont

moins bien été en mesure de trouver des solutions valables aux problèmes proposés que ceux qui ont reçu l'enseignement. La deuxième étude a donc examiné comment le fait de fournir aux élèves les connaissances préalables nécessaires à la résolution de problèmes a influencé leurs apprentissages ultérieurs lors de la phase d'enseignement. Bien que ces connaissances préalables aient aidé les élèves à mieux résoudre les problèmes, elles ne semblent pas leur avoir conféré d'avantages quelconques en termes d'apprentissages lors de l'enseignement. Au contraire, leurs gains d'apprentissage ont été similaires à ceux des élèves qui n'avaient pas ces connaissances préalables ; en outre, ils ont démontré un moindre engagement et un effort mental plus important au cours de l'enseignement qui a suivi. Les auteurs en concluent que l'enseignement basé sur les *productive failures* ne s'applique sans doute pas à un domaine où les élèves ne possèdent pas de connaissances préalables, mais aussi à un domaine qui demeure abstrait et très éloigné de leur expérience quotidienne, comme la génétique.



Utilisation d'images et d'animations vidéo pour l'enseignement de la génétique

En génétique, la plupart des mécanismes à l'origine des manifestations extérieures de l'évolution et de l'hérédité (phénotype) sont invisibles à l'œil nu et ne sont donc pas perçus par nos sens. Bien qu'il soit possible d'étudier une cellule au microscope à l'aide d'équipements que l'on retrouve typiquement dans une école secondaire, l'observation directe de phénomènes comme la méiose et la mitose demeure difficile. Quant aux processus moléculaires se déroulant au niveau de l'ADN et des protéines, ces derniers nous échappent complètement. Pire encore, les manifestations observables de la présence de ces entités, telles les bandes apparaissant sur un gel d'électrophorèse, peuvent faire croire aux élèves qu'il s'agit là de la véritable structure de l'ADN (Ben-Nun et Yarden, 2009). Pour pallier ces limitations, les enseignantes et les enseignants recourent depuis longtemps aux images fixes (illustrations, photos, schémas, etc.) et, depuis plus récemment, aux films, animations et simulations vidéo pour montrer aux élèves les aspects dynamiques des phénomènes génétiques souvent invisibles.

Ainsi, Starbek *et al.* (2010) ont mené une étude auprès d'élèves slovènes étudiant en 12^e et 13^e années (âgés en moyenne de 18 ans) sur l'intérêt de l'utilisation d'images et de vidéos pour enseigner la génétique et les concepts liés à la synthèse des protéines. Les chercheurs ont comparé quatre conditions expérimentales : un cours magistral ; la lecture d'un texte ; une présentation multimédia comprenant deux animations vidéo présentées sur un écran d'ordinateur ; et la lecture d'un texte accompagné d'images statiques. L'objectif principal était de vérifier si l'utilisation du multimédia dans

l'enseignement de la génétique favorise les apprentissages des élèves par rapport à d'autres modes d'enseignement.

La comparaison des résultats du prétest, du post-test et du post-test avec délai effectué cinq semaines après la fin de l'enseignement montre que les élèves qui ont étudié à l'aide du multimédia avec animations vidéo et ceux qui ont étudié à l'aide du texte et des images fixes ont davantage appris à propos de la synthèse des protéines que les élèves des deux autres groupes, mais sans qu'il y ait de différence significative entre ces deux premiers groupes. Les auteurs proposent plusieurs hypothèses pour expliquer ces résultats, notamment la difficulté pour les élèves d'interpréter les animations vidéo sans un certain bagage de connaissances préalables, ou encore le fait que les courtes animations étaient sous-titrées en anglais, une langue peu familière à la plupart des élèves slovènes. Malgré tout, les auteurs affirment que leurs résultats montrent le grand potentiel éducatif d'un matériel didactique soigneusement conçu combinant texte et images (statiques ou animées).

Yarden et Yarden (2010) ont eux aussi comparé l'effet d'images statiques et d'une animation vidéo sur les apprentissages de 173 élèves israéliens de 12^e année (âgés de 16 à 18 ans), répartis à parts égales en deux groupes. Le sujet de l'animation vidéo présentée aux élèves du groupe traitement était la réaction de polymérase en chaîne de l'ADN, tandis que les images statiques montrées aux élèves du groupe témoin étaient des copies d'écran extraites de l'animation. Les deux groupes ont en outre étudié les mêmes concepts durant la même période. La comparaison des résultats des deux groupes après l'enseignement indique un net avantage de la vidéo par rapport aux images fixes, en particulier pour l'enseignement de processus dynamiques invisibles à l'œil nu, comme les mécanismes génétiques qui se déroulent au niveau moléculaire.

Les diagrammes génétiques sont des représentations graphiques couramment utilisées dans l'enseignement de la génétique qui montrent comment le phénotype des parents traduit leur génotype et comment les génotypes des descendants, ainsi qu'ultimement de nouveaux phénotypes, résultent de la combinaison des génotypes des parents. Ces diagrammes associent donc dans une même représentation deux niveaux d'organisation génétique différents, le génotype et le phénotype. Ces diagrammes sont difficiles à interpréter par des élèves du secondaire, d'une part en raison de leur aspect statique et schématique et de leur syntaxe (par exemple, des phénomènes dynamiques, comme la méiose et la mitose, sont illustrés par de simples flèches), et, d'autre part, parce que les élèves ont du mal à établir des liens entre ces deux niveaux d'organisation.

Afin de remédier aux difficultés liées à l'utilisation d'images statiques pour représenter ce genre de processus dynamiques, Hung et Fung (2017) ont conçu une séquence d'enseignement qui utilise une approche hybride, mélangeant les diagrammes statiques avec des animations qui mettent en lumière les entités et les processus au niveau cellulaire (division cellulaire, chromosomes) et au niveau de l'organisme (fertilisation, loi de Mendel). Les animations « déconstruisent » les diagrammes afin d'illustrer les mécanismes qui se cachent derrière les symboles utilisés.

Vingt-deux élèves hongkongais de la fin du secondaire ont participé à l'étude des deux chercheurs en répondant à deux reprises au même questionnaire (questionnaire constitué de questions à choix multiples et ouvertes) : une première fois avant l'utilisation de l'approche hybride et une seconde fois environ deux mois et demi plus tard. Des entrevues ont également été menées avec six élèves choisis au hasard. La comparaison des résultats pré- et post-test montre une amélioration

significative de la performance des élèves après l'enseignement dans toutes les catégories étudiées (terminologie, processus cytologique, représentation symbolique et calcul des probabilités). En entretien, davantage d'élèves étaient en mesure de décrire des mécanismes entrant en jeu au niveau moléculaire pour expliquer les processus de la méiose et de la mitose, mais une certaine confusion demeurait quant aux liens qui existent entre les différents niveaux d'organisation en génétique. De l'aveu même des chercheurs, une amélioration est possible en ce qui concerne la compréhension par les élèves des processus dynamiques au niveau de la cellule et de l'organisme, mais leur approche hybride semble être un pas dans la bonne direction.

Cook, Wiebe et Carter (2011) ont étudié l'effet qu'avaient divers éléments visuels contenus dans une présentation d'images statiques (de type *PowerPoint*) décrivant les différentes étapes de la réplication de l'ADN sur l'attention et les apprentissages des participants. Il s'agissait de 21 jeunes filles âgées de 11 à 14 ans séjournant dans un camp d'été scientifique. L'étude a été conduite deux étés de suite : la première année, une première version de la présentation a été testée, puis modifiée à la lumière des résultats avant d'être testée l'année suivante. Les chercheurs ont utilisé un dispositif de suivi oculaire pour déterminer quels éléments de la présentation attiraient le plus l'attention des participantes (flèches, couleurs, formes, etc.) ; ensuite, ils ont mené des entrevues avec les enfants pour évaluer leur compréhension du contenu de la présentation.

Bien qu'une nette amélioration ait été observée entre les résultats de la première année et ceux de la suivante (par exemple, les différents éléments visuels ont été plus facilement interprétés par les participantes), cela n'a pas nécessairement contribué à une meilleure compréhension du mécanisme de la réplication de l'ADN. Par exemple, l'utilisation d'une flèche pour

indiquer le sens d'ouverture de la double hélice de l'ADN ou la présence de nucléotides de différentes couleurs a bel et bien attiré l'attention des participantes vers des éléments importants de l'illustration, mais cela ne s'est pas traduit par une meilleure compréhension du mécanisme de réplication de l'ADN. Il ne semble donc pas y avoir de lien direct entre l'attention portée par des élèves à une image ou à ses éléments et l'interprétation correcte ou non qu'ils en font ou leur compréhension du phénomène illustré.

Ferdig *et al.* (2015) se sont intéressés à l'utilisation d'images stéréoscopiques de la cellule et de l'ADN pour enseigner des concepts en génétique auprès d'élèves étasuniens du secondaire. Les chercheurs ont récolté des données qui montrent que les participants ont beaucoup apprécié les images, ce qui a amélioré leur engagement dans l'apprentissage, mais on en sait malheureusement peu sur l'impact au niveau des apprentissages eux-mêmes, puisqu'aucune mesure de l'effet éducatif de ces images n'a été rapportée. Dans une étude précédente, les chercheurs avaient analysé l'effet sur l'apprentissage de l'utilisation, par les élèves, d'images stéréoscopiques du cerveau humain ; les résultats avaient montré des gains significatifs de la part de ces élèves par rapport à ceux d'un groupe témoin qui n'avaient utilisé que des images 2D, mais il serait hasardeux de transposer ces résultats à l'utilisation d'images stéréoscopiques de la cellule et de l'ADN. Les auteurs signalent tout de même que le choix des modèles à présenter sous forme stéréoscopique doit faire l'objet d'une réflexion approfondie.

Yang *et al.* (2018) ont comparé deux séances d'enseignement à propos de la division cellulaire, la méiose et la mitose, l'une se servant d'images statiques et l'autre, d'animations vidéo. Le contenu et la durée des deux séances (deux fois 50 minutes) étaient identiques. Les chercheurs ont formé deux groupes de

taille similaire à partir d'un bassin de 181 élèves taiwanais de 7^e année. Ils ont ensuite demandé aux participants de répondre à des questionnaires à questions ouvertes avant et après l'enseignement et d'estimer leur charge mentale après les deux séances. Les résultats montrent de meilleurs apprentissages et une moindre charge cognitive extrinsèque pour les élèves qui ont étudié avec les animations. Par contre, les différences observées entre les deux groupes en ce qui a trait à la charge cognitive totale, ainsi que les réponses à un questionnaire à choix multiples à propos des apprentissages des élèves, ne sont pas significatives. Les chercheurs en concluent tout de même que pour l'enseignement de concepts liés à des phénomènes dynamiques invisibles à l'œil nu, comme la division cellulaire, les animations vidéo semblent favoriser les apprentissages en comparaison des images fixes.



Modèles et modélisation

Si les images statiques et les animations vidéo permettent de « voir » des entités et des phénomènes invisibles à l'œil nu, les modèles 3D utilisés dans l'enseignement de la génétique (modèles de la double hélice de l'ADN, modèles moléculaires, modèle de la cellule, etc.) permettent, quant à eux, de visualiser dans l'espace les relations existantes entre différentes parties de ces entités, relations spatiales que des images 2D (statiques ou animées) ne mettent pas aussi bien en évidence. De plus, ces modèles peuvent être manipulés, autorisant les élèves à « penser avec leurs mains », une importante composante des apprentissages en science.

Jittivadhna, Ruenwongsa et Panijpan (2010) ont étudié l'impact éducatif de divers modèles 3D moléculaires (ADN et protéines) sur 498 élèves thaïlandais, des élèves de la 9^e à la 12^e année du secondaire (âgés de 14 à 19 ans), mais aussi sur des étudiants commençant leurs études de médecine (âgés de 17 à 20 ans). Aucun élève n'avait travaillé auparavant avec des modèles 3D, seulement avec des illustrations 2D de la structure de l'ADN et des protéines tirées de manuels scolaires. Les modèles 3D développés par les chercheurs, que l'on peut imprimer sur des feuilles de plastique transparentes (acétates) et que les élèves peuvent assembler eux-mêmes, sont décrits dans Jittivadhna, Ruenwongsa et Panijpan (2009). Les résultats, tant qualitatifs (entrevues et questions ouvertes) que quantitatifs (questionnaire à choix multiples), montrent l'effet très positif de la construction et de la manipulation par les élèves de modèles 3D d'ADN et de protéines sur leur compréhension de la structure moléculaire et biophysique de la double hélice et de ses composantes. Certaines caractéristiques des modèles présentés semblent

toutefois très complexes pour les élèves plus jeunes qui en sont tout au début de leurs apprentissages en génétique. D'autre part, la présentation des résultats de cette étude ne permet malheureusement pas de distinguer ceux obtenus avec les élèves plus jeunes de ceux obtenus avec les étudiants plus âgés, deux populations pourtant fort différentes.

Puig, Ageitos et Jiménez-Aleixandre (2017) ont conçu une activité de modélisation en génétique qu'ils ont couplée à une activité d'argumentation, en se demandant quelles stratégies les élèves mettent en œuvre dans chacune des deux activités et comment ils les intègrent dans le processus de modélisation d'une maladie génétique, le tout en lien avec trois cadres de référence utilisés pour l'analyse, soit la théorie génétique, les phénotypes et les modèles 3D construits par les élèves. L'étude a réuni 20 élèves espagnols âgés de 15 à 17 ans, regroupés en équipes de quatre. Elle fait partie d'une recherche plus vaste qui a été conduite sur deux années scolaires (2014-2016).

Dans la présente étude, les chercheurs ont demandé à chaque équipe de construire une représentation de l'expression des gènes afin d'expliquer une maladie génétique, la drépanocytose. Les élèves ont été invités à créer une représentation concrète des éléments et des processus moléculaires impliqués dans l'expression génétique de cette maladie, en prenant le phénotype comme point de départ (c.-à-d. deux échantillons de sang dont l'un montre des signes de la maladie). Pour ce faire, chaque équipe a reçu une trousse contenant des pièces correspondant aux entités moléculaires impliquées dans l'expression des gènes. L'activité s'est déroulée sur deux séances de 50 minutes chacune. Au cours de la première, les élèves ont été invités à créer leurs propres représentations de l'expression des gènes à partir du

matériel fourni, tandis que la deuxième a été consacrée à l'explication, à la comparaison des modèles de chaque équipe, à la révision de chacun des modèles par les élèves n'ayant pas participé à sa construction (démarche argumentative) et à la détermination de la meilleure représentation parmi toutes celles qui ont été proposées.

Les chercheurs ont enregistré et codé les interactions entre les élèves et les équipes pendant qu'ils développaient leurs modèles et les comparaient, le tout en fonction des trois cadres de référence décrits plus haut. Il s'avère que les élèves ont établi davantage de liens entre la théorie et leurs représentations qu'avec le phénotype de la maladie. L'explication, selon les auteurs, serait que les élèves ont construit leur représentation (modélisation) en se basant surtout sur leurs connaissances théoriques à propos des processus génétiques impliqués, plutôt qu'en essayant de connecter leur représentation avec le phénotype. Cela trahit le fait que les élèves voient la modélisation comme un processus mécanique de représentation (on veut que le modèle « ressemble » à l'entité représentée) plutôt que comme un processus explicatif ou prédictif (on souhaite que le modèle représente la dynamique d'un phénomène). En fait, les connexions du modèle avec le monde naturel (le phénotype) étaient les plus rares et, lorsque les élèves le reliaient à la théorie, aucune opération de modélisation n'était impliquée. Dans un tel cas, la maladie choisie, la drépanocytose, pourrait avoir présenté un phénotype trop abstrait (invisible à l'œil nu) pour que les élèves puissent facilement relier leurs représentations (modèles) au phénotype.

L'analyse des résultats a tout de même permis aux auteurs de conclure que les interactions entre la modélisation et l'argumentation par les élèves semblent faciliter l'établissement

de liens entre ces différents cadres de référence (le modèle, la théorie et le monde naturel, ou le phénotype) et le développement chez eux d'une représentation plus sophistiquée de l'expression génétique. Les auteurs considèrent donc l'argumentation et la modélisation comme deux pratiques étroitement liées dans l'acquisition des connaissances des élèves, mais sans pouvoir dire laquelle des deux favorise l'autre ; leurs résultats suggèrent plutôt l'existence d'une contribution mutuelle entre ces deux pratiques.

Ageitos, Puig et Colucci-Gray (2019) présentent les résultats d'une autre composante de la vaste étude pluriannuelle évoquée par Puig, Ageitos et Jiménez-Aleixandre (2017), impliquant les mêmes 20 élèves espagnols, âgés de 15 à 17 ans, dans une activité de modélisation et d'argumentation où il leur était demandé d'explicitier les liens entre la drépanocytose et le paludisme (malaria). Les élèves devaient appliquer des notions apprises précédemment, comme la génétique mendélienne et moléculaire, ainsi que la théorie de l'évolution des espèces, pour décrire les relations entre les deux maladies. Cette étude cherchait à déterminer les connexions faites par les élèves entre leurs pratiques rhétoriques, leurs pratiques d'argumentation et leur connaissance du contenu notionnel dans les domaines de la génétique et de l'évolution des espèces, le tout dans le but d'évaluer la dimension critique de leur discours scientifique. Dans cette optique, ce discours ne doit pas être simplement considéré comme un moyen de trouver « la bonne réponse », mais plutôt comme un processus visant à renforcer la pensée critique et réflexive des élèves en ce qui concerne la sélection et l'utilisation de preuves au sein d'un débat scientifique. Les chercheurs se sont donc demandé quels raisonnements émergent des pratiques rhétoriques des élèves, basées sur les preuves

scientifiques, en rapport avec leurs apprentissages à propos de la génétique et l'évolution, et quelles pratiques épistémiques aident les élèves à établir des liens explicites entre la génétique et l'évolution.

Les résultats indiquent que, bien que les pratiques rhétoriques aient aidé les élèves à rassembler et utiliser des données scientifiques, l'utilisation de preuves pour soutenir leurs affirmations est restée somme toute limitée. Inversement, le type de pratiques épistémiques mises en œuvre par les élèves (chercher et interpréter de l'information, situer la question dans le temps et l'espace, définir les termes, etc.) semble être directement lié à la nature des données analysées. Par conséquent, les pratiques rhétoriques combinées aux pratiques d'argumentation semblent expliquer les performances variées des élèves dans la construction d'explications plus complexes sur des sujets liés à l'évolution des espèces.

L'analyse des pratiques rhétoriques indique que les élèves ont mobilisé plusieurs sources d'information, bien que les pratiques discursives déployées n'aient pas nécessairement soutenu des niveaux élevés d'utilisation de preuves. En particulier, les élèves ont eu du mal à construire des explications biologiques interconnectées ; par exemple, ils ont eu de la difficulté à relier des entités et des processus biologiques appartenant à différents niveaux d'organisation, entre la génétique moléculaire et la génétique mendélienne ainsi qu'entre la génétique et l'évolution. Les auteurs en concluent qu'une meilleure compréhension de la part des élèves des pratiques de raisonnement et de la manière dont elles sont façonnées par leurs pratiques discursives est nécessaire dans l'enseignement de la biologie, afin d'aider les élèves à considérer les processus biologiques dans un contexte plus large, et donc à mieux comprendre les phénomènes évolutifs.

Mierdel et Bogner (2019a) ont voulu comparer l'effet de la construction d'un modèle concret de l'ADN ou de l'utilisation d'un modèle déjà existant par les élèves sur leur compréhension du rôle des modèles en science. Plus spécifiquement, les chercheurs se sont demandé s'il y a une différence dans le raisonnement des élèves en ce qui concerne les modèles scientifiques en fonction de l'approche choisie (utilisation ou construction de modèle), dans quelle mesure les deux approches affectent la compréhension que les élèves ont des modèles scientifiques en tant que répliques exactes, et comment les activités basées sur les modèles concrets influencent la compréhension qu'ont les élèves de la nature changeante (évolutive) des modèles scientifiques. L'expérience a eu lieu dans le même laboratoire que celui de l'équipe de F. X. Bogner, en Bavière, et a impliqué 293 élèves de 9^e année.

L'activité de modélisation, intitulée *Simply inGEN(E)ious! DNA as a carrier of genetic information* (voir Mierdel et Bogner (2020) pour une description détaillée), faisait partie d'une expérience de laboratoire visant à isoler de l'ADN prélevé sur la muqueuse buccale des élèves et à pratiquer une électrophorèse. Les participants ont été répartis en deux groupes : les modélisateurs et les utilisateurs de modèles. Les premiers ont reçu la tâche de concevoir un modèle d'une chaîne d'ADN à partir de divers matériaux de bricolage fournis, tandis que les autres devaient identifier les différentes parties d'un modèle commercial représentant la double hélice. Les deux groupes devaient ensuite réaliser un dessin identifiant les différentes parties de l'ADN.

D'un point de vue quantitatif (comparaison d'un questionnaire pré- et post-test), les deux groupes ont démontré une amélioration équivalente de leur compréhension du rôle

des modèles et de la modélisation en science, prouvant ainsi que même une courte intervention pouvait contribuer à une meilleure compréhension. Il n'y avait par contre pas de différence significative entre les groupes au post-test. D'un point de vue qualitatif (questions ouvertes posées aux élèves), les élèves des deux groupes ont été en mesure d'argumenter sur la nature et le rôle des modèles et de la modélisation et d'expliquer pourquoi il peut exister simultanément plusieurs modèles qui sont tous valides en fonction de leur usage, ou que divers modèles peuvent être nécessaires pour représenter divers mécanismes, mais sans différence significative entre les deux groupes traitement. En conclusion, il semble qu'ajouter une activité de modélisation (construction ou utilisation d'un modèle) à l'intérieur d'une activité de laboratoire de type « mains-à-la-pâte » favorise la compréhension par les élèves de la nature et du rôle des modèles en science.

Les mêmes auteurs (Mierdel et Bogner, 2019b) ont utilisé une situation d'enseignement semblable à celle décrite ci-dessus (Mierdel et Bogner, 2019a) auprès d'élèves bavarois de 9^e année (âgés en moyenne de 14,5 ans) pour comparer l'impact des deux approches (modélisation ou utilisation d'un modèle) sur les résultats cognitifs (apprentissages), la charge cognitive et l'efficacité pédagogique (c.-à-d. le lien entre l'effort mental et la performance). Ils ont divisé 254 élèves en deux groupes : les modélisateurs, qui ont dû créer un modèle d'ADN en utilisant divers matériaux de bricolage, et les utilisateurs de modèles, qui ont travaillé avec un modèle éducatif commercial représentant la structure de l'ADN. Dans leur étude, les élèves ont complété un prétest visant à mesurer leur niveau de connaissances à propos de l'ADN et des procédures de laboratoire deux semaines avant de participer à l'activité, puis un post-test immédiatement

après et un post-test de rétention six semaines plus tard. Les chercheurs ont également mesuré l'effort mental rapporté par les élèves à quatre reprises au cours de la journée passée au laboratoire dans le but d'évaluer la charge cognitive exigée par les différentes tâches.

Les élèves utilisateurs du modèle ont obtenu des résultats significativement meilleurs en ce qui concerne l'augmentation de leurs connaissances à moyen terme, tandis que les scores individuels de charge cognitive (effort mental) pendant l'activité sont restés similaires d'un groupe à l'autre. Par contre, l'efficacité pédagogique différait significativement entre les deux groupes, avec des scores plus élevés pour les utilisateurs de modèles, ce qui signifie qu'un effort similaire a induit chez eux de meilleures performances cognitives que chez les concepteurs de modèles. Il semble donc que l'approche consistant à offrir aux élèves un modèle déjà existant de la double hélice de l'ADN produise des résultats significativement meilleurs en termes d'efficacité pédagogique, ce que les auteurs lient à une meilleure perception par les élèves de la structure de l'ADN telle que présentée par le modèle éducatif commercial. La construction d'un modèle de l'ADN par des élèves qui ne maîtrisent pas complètement les aspects théoriques de ce concept et qui ont peu d'expérience de modélisation est peut-être trop complexe et perturbée par les conceptions alternatives auxquelles les élèves adhèrent et sur lesquelles ils se basent pour réaliser leur modèle. D'autre part, construire un modèle prend du temps et il se peut que l'activité ait été de trop courte durée pour permettre aux élèves d'atteindre un résultat satisfaisant.

Les auteurs suggèrent d'apporter deux ajustements à leur pratique pédagogique. Premièrement, débiter par

une phase de « prémodélisation » avant de passer à la phase d'élaboration du modèle, ce qui favoriserait le développement de plusieurs compétences en modélisation chez les élèves (chercher de l'information ; créer un modèle mental ; en créer une représentation concrète ; explorer sa portée et ses limites, voir Justi et Gilbert, 2002). Deuxièmement, conduire une évaluation plus détaillée du modèle (discussion entre élèves pour comparer les différents modèles au sein de la classe, une approche similaire à celle testée par Puig, Ageitos et Jiménez-Aleixandre, 2017) semble être une autre façon d'amener les élèves à améliorer leurs modèles par itérations successives. Enfin, les auteurs ajoutent que les enseignants eux-mêmes doivent améliorer leurs compétences de modélisation afin de bien guider leurs élèves (Justi, 2009).

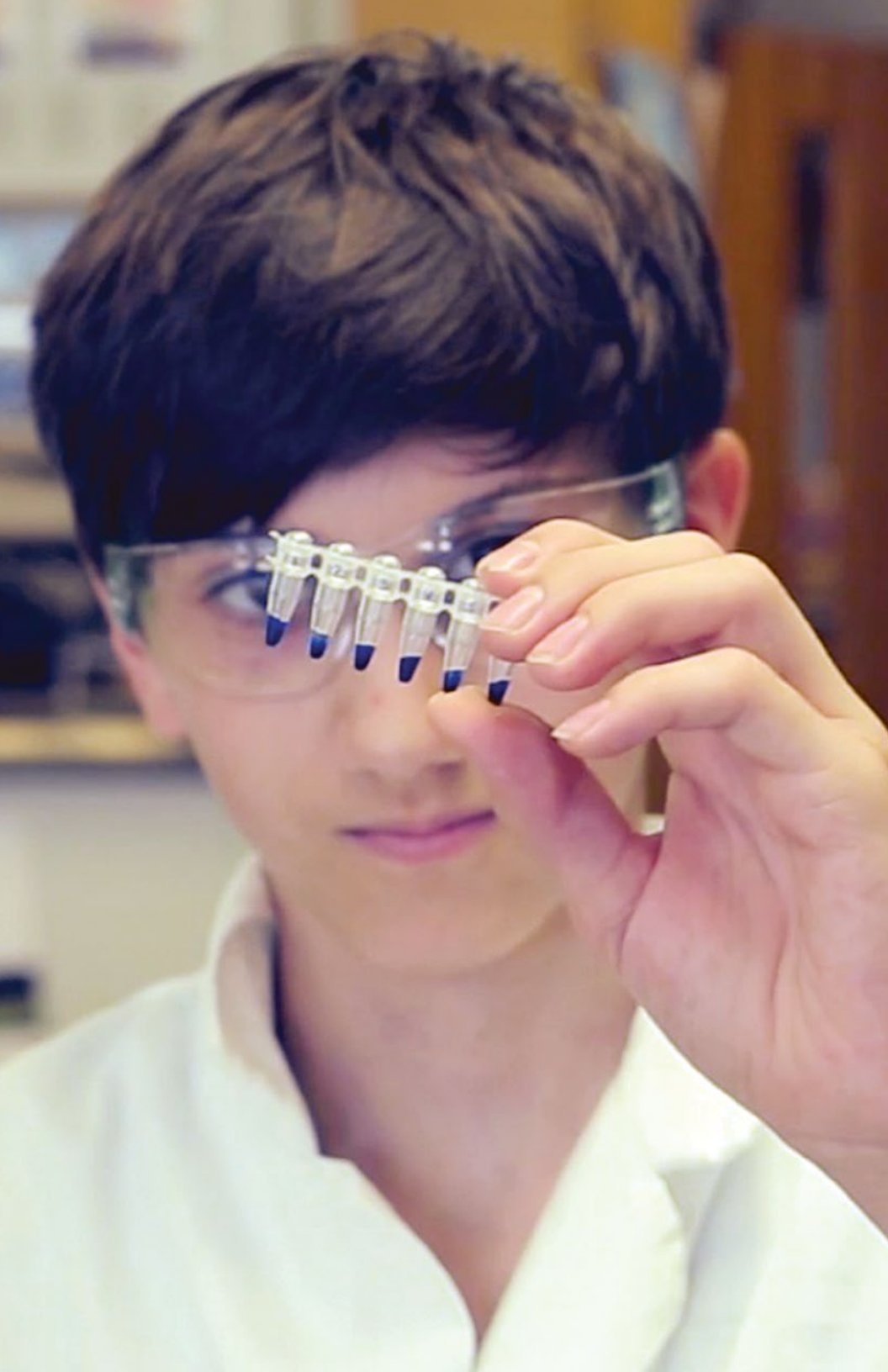
Dans une troisième étude similaire, Mierdel et Bogner (2019c) se sont demandé jusqu'à quel point une approche basée sur la modélisation dans un laboratoire de génétique influence les résultats cognitifs des élèves, dans quelle mesure la créativité est liée aux résultats cognitifs lorsque des modèles sont construits par les élèves, si la qualité du modèle est liée à la créativité individuelle et au niveau de connaissance, et s'il existe des différences de genre dans les résultats entre garçons et filles. Leur approche éducative (*Simply inGEN(E)ious! DNA as a carrier of genetic information*), conçue pour des élèves bavarois de 9^e année, associait l'expérimentation en laboratoire à la création de modèles pour visualiser la structure de l'ADN au niveau moléculaire. Après une première étape de modélisation mentale, les 114 élèves participants (âgés en moyenne de 14,7 ans, un peu moins de la moitié étaient des filles) ont construit un modèle physique de l'ADN en utilisant du matériel de bricolage. Les chercheurs ont évalué la

qualité des modèles, la créativité individuelle et les niveaux de connaissances des élèves afin d'établir des corrélations entre ces diverses mesures. L'approche méthodologique était la même que celle utilisée par Mierdel et Bogner (2019b). Le jugement concernant la qualité des modèles s'est fondé sur les différentes catégories créées par Langheinrich et Bogner (2015).

Bien qu'aucune relation n'ait été trouvée entre la créativité individuelle et la qualité des modèles, des différences de genre sont apparues. Les filles ont réalisé des modèles significativement de meilleure qualité que les garçons et des corrélations positives significatives sont apparues entre la qualité des modèles construits par les filles et leurs niveaux de connaissance à court et à moyen terme. Le niveau de connaissance des filles était significativement plus bas que celui des garçons avant l'activité, mais la construction du modèle leur a permis de rattraper leurs collègues masculins. Une corrélation positive a également été observée entre les résultats cognitifs (apprentissages) des filles et une échelle mesurant leur créativité (le « *flow* »). En revanche, ni la créativité ni la qualité du modèle n'ont eu d'effet déterminant en ce qui concerne les résultats cognitifs des garçons. La moindre qualité de leurs modèles n'était pas corrélée avec leurs niveaux de connaissances à court et moyen terme, bien que les garçons aient obtenu des scores similaires dans les deux cas. L'élaboration de modèles par les élèves semble permettre aux filles de mieux s'appropriier les contenus notionnels et constitue donc une approche adaptée pour mettre l'accent sur la créativité dans l'enseignement des sciences et attirer davantage les filles vers ces domaines d'étude. D'autre part, il se peut que la créativité soit une habileté essentielle à développer si l'on souhaite que les

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

élèves maîtrisent les techniques et les visées de la modélisation. Comme le rappellent les auteurs, la créativité joue en science un rôle primordial dans l'avancement des connaissances.



Apprentissages en laboratoire

Les activités pratiques en milieu scolaire (expériences de laboratoire, activités de type « mains-à-la-pâte », démarches d'investigation scientifique, etc.) sont généralement considérées comme importantes pour faciliter l'apprentissage de concepts scientifiques par les élèves, puisqu'elles leur permettent de réaliser des expériences ou des observations qu'ils ne pourraient pas faire autrement (Hofstein et Lunetta, 2004 ; Wolyniak, 2013). Néanmoins, plusieurs pratiques pédagogiques actuelles semblent favoriser l'enseignement théorique, au détriment des travaux pratiques, particulièrement en biologie (Scharfenberg, Bogner et Klautke, 2007). De plus, dans le domaine plus spécifique de la génétique et de la biologie moléculaire, les difficultés liées à la disponibilité de matériel spécialisé et d'équipements de pointe dans les écoles secondaires limitent les possibilités d'expériences de laboratoire significatives. C'est pourquoi les laboratoires situés hors de l'école, que ce soit dans des universités, des collèges ou des centres de recherche, offrent de bien meilleures conditions d'apprentissage en génétique cellulaire et moléculaire pour les élèves que la plupart des laboratoires situés dans les écoles secondaires. Il existe toutefois des facteurs, liés à l'accessibilité de ces lieux et à la relativement courte durée des visites que les élèves peuvent y effectuer, qui peuvent en limiter considérablement la portée éducative.

Dans une étude de cas menée dans une classe-laboratoire étasunienne multiniveaux (de la 8^e à la 10^e année) accueillant 15 élèves, Grady, Dolan et Glasson (2010) ont analysé la façon dont les travaux pratiques mis en place par l'enseignante ont permis aux élèves de comprendre et s'approprier la démarche d'investigation scientifique (*scientific inquiry*) et comment cela a influencé leur représentation de la nature de l'activité

scientifique (NAS). L'institution où a eu lieu la recherche est une école d'agriculture ; plusieurs finissants de cette école entrent directement sur le marché du travail une fois leurs études secondaires complétées. L'expérience, menée par l'enseignante et ses élèves, de type « résolution de problèmes », avait pour but de découvrir quel gène d'une plante OGM poussant en laboratoire avait été volontairement rendu inopérant, et à quelle condition environnementale (résistance à la sécheresse, aux insecticides, etc.) ce gène correspondait.

Les données ont été recueillies auprès des élèves de diverses manières : observations du comportement des élèves en classe, conversations entre et avec les élèves, analyse des travaux scolaires, etc. En présentant les résultats de leur étude, les auteurs montrent « en creux » (par le contre-exemple) ce qu'il ne faut pas faire dans un laboratoire de génétique si l'on souhaite développer chez les élèves une meilleure compréhension de la démarche d'investigation scientifique et une meilleure compréhension de la nature de la science. Par exemple, là où il aurait fallu une démarche ouverte permettant aux élèves de discuter entre eux et avec l'enseignante, de concevoir leur propre protocole expérimental, de faire des essais et des erreurs, de consigner leurs résultats et de les présenter de diverses manières afin de leur donner un sens (par exemple, graphiques à bandes), l'enseignante a plutôt préparé des protocoles stricts de type « recette » laissant peu de liberté aux élèves ; ces derniers n'avaient pas non plus le droit de parler en classe. Lorsque des choix étaient autorisés par le protocole (par exemple, arroser des plantes modifiées génétiquement avec divers contaminants), l'enseignante ne demandait pas aux élèves de les justifier par le biais d'une hypothèse. Les résultats devaient être présentés dans des phrases trouées créées par l'enseignante. Il en ressort que pour cette dernière et ses élèves,

la démarche d'investigation scientifique est restée une activité plutôt mécanique et prédéterminée, centrée sur les processus et non pas sur les idées créatives des élèves, ce qui fausse leur vision de ce qu'est la nature de la science.

Les auteurs remarquent que la formation initiale de l'enseignante ne l'avait pas préparée à laisser ses élèves libres d'expérimenter, et qu'elle désirait par-dessus tout garder le contrôle de sa classe, composée d'élèves plus ou moins en difficulté. Ils notent également que les élèves eux-mêmes n'étaient pas prêts à prendre en charge les expériences sans un encadrement très rigide, et qu'il est, de ce fait, très important de permettre aux apprenants de se familiariser tôt avec ces nouveaux rôles que l'on souhaite les voir jouer en classe de science. Il s'agit donc de changer la culture de la classe et la nature du contrat didactique entre enseignants et apprenants, en plus d'améliorer la formation des enseignants.

Scharfenberg et Bogner (2010) ont accueilli des élèves bavarois de 12^e année (âgés en moyenne de 18 ans) pendant une journée complète dans un laboratoire de génétique situé hors des murs de leur école. Il s'agissait du *Gene-Technology Demonstration Laboratory* de l'Université de Bayreuth. L'objectif des chercheurs était de mesurer l'effort mental et les performances cognitives (apprentissages) des élèves répartis dans deux groupes : un premier participant aux activités de laboratoire de manière conventionnelle et un second à qui on a alloué une période d'environ cinq minutes de discussion et d'échanges en petits groupes avant chaque phase de l'expérience. Durant ces échanges, les élèves étaient encouragés à émettre des idées et des suggestions avant même d'entreprendre les manipulations et les procédures expérimentales. La séance de laboratoire de la présente étude consistait en une

série d'expériences autour du thème des gènes marqueurs insérés dans les bactéries.

L'effort mental des élèves a été mesuré à neuf reprises au cours de la journée, tandis que les apprentissages ont été évalués à l'aide d'un prétest, d'un post-test et d'un post-test avec délai. La combinaison de ces mesures a également permis de comparer l'efficacité des deux approches éducatives. Les résultats montrent que la phase de préparation et de discussion avant les manipulations en laboratoire diminue la surcharge cognitive, mène à de meilleurs apprentissages et à une plus grande efficacité éducative à court et à moyen terme que les travaux de laboratoire menés sans une telle préparation.

Utilisant les deux mêmes traitements en laboratoire que ceux décrits ci-dessus, mais avec quelques-uns seulement des élèves ayant participé à leur étude de 2010, Scharfenberg et Bogner (2011) ont cette fois filmé les élèves des deux groupes tandis qu'ils participaient aux activités et expériences en laboratoire. Leur but était d'identifier les différents types de comportements des élèves en fonction des deux traitements mis en place, c'est-à-dire avec et sans discussion préalable aux activités de laboratoire en petits groupes. L'analyse des interactions entre les élèves montre un autre avantage des conciliabules tenus avant chaque expérience. En effet, il s'avère que les tâches sont alors mieux réparties entre les élèves et que les processus de prise de décision sont plus « démocratiques » quand les élèves ont discuté avant d'expérimenter ; il y a aussi davantage d'interactions entre les membres de l'équipe, après ces discussions, en cours d'expérimentation.

D'autre part, les chercheurs constatent que certains comportements « indésirables » en laboratoire, comme des élèves qui prennent en charge seuls toutes les manipulations tandis que les autres se contentent d'observer, se transforment après un

conciliabule : lorsque les élèves se consultent, ils ont tendance à mieux se répartir le travail, si bien que les comportements moins collaboratifs ont tendance à disparaître. Selon les chercheurs, cela serait dû à une meilleure communication au sein de ces groupes d'élèves. De plus, les chercheurs remarquent que ces comportements plus démocratiques et collaboratifs entraînent des niveaux plus élevés de compréhension des concepts et une plus grande motivation de la part des élèves.

Toujours dans le même laboratoire où les élèves ont été accueillis pour vivre une journée complète d'activités expérimentales en génétique, Scharfenberg et Bogner (2013a) ont cette fois-ci étudié l'effet de la présence d'un tuteur, c'est-à-dire une personne accompagnant les élèves réunis en dyades durant les expériences, sur les efforts investis par les élèves (charge cognitive), leurs apprentissages et le niveau de coopération entre les élèves de chaque dyade. Les chercheurs se sont également attardés au type d'intervention directe à laquelle se livraient les tuteurs au cours des manipulations. L'intervention en laboratoire, intitulée « *Genetic Fingerprinting* », consistait en une série d'expériences portant sur le séquençage et l'identification de l'ADN.

Les 269 élèves bavarois de 12^e année (âgés en moyenne de 18,1 ans) ont été répartis en deux groupes : un groupe traitement où chaque dyade était accompagnée d'un tuteur, et un groupe témoin sans tuteur. La comparaison des deux groupes a porté sur l'analyse des gestes exécutés par les élèves durant les expériences, de leurs interactions avec les tuteurs, de même que sur l'analyse des mesures d'effort mental, d'apprentissages et d'efficacité de l'enseignement (c.-à-d. une combinaison des deux construits précédents). Contrairement à ce à quoi s'attendaient les chercheurs, les élèves accompagnés par les tuteurs n'ont pas mieux réussi que ceux du groupe témoin pour

chacun des construits mesurés ; pire, en termes d'efficacité, le groupe traitement a moins bien réussi que le groupe témoin. Ces résultats soulignent bien toute la difficulté, pour un tuteur ou un enseignant, d'accompagner les élèves dans leurs apprentissages en laboratoire, sans leur donner la bonne réponse trop tôt, ni trop attendre avant qu'ils ne se découragent et cessent de faire des efforts de compréhension. Il paraît donc important d'investir dans la formation des tuteurs et des enseignants. Mais il est aussi possible que la présence d'un tuteur diminue la motivation et la volonté des élèves de se débrouiller seuls face à des difficultés en laboratoire ; les chercheurs admettent que cette avenue devra être explorée davantage.

Scharfenberg et Bogner (2013b) ont réuni 409 élèves de 12^e année (âgés en moyenne de 18,1 ans) dans leur laboratoire et ont étudié diverses variables à plusieurs moments de l'activité. Par exemple, une semaine avant le début de l'activité, ils ont mesuré l'intérêt des élèves envers les sciences et la génétique, leurs connaissances, leur tolérance à l'incertitude et ils les ont interrogés sur leurs expériences préalables en laboratoire. Durant les activités de laboratoire, les chercheurs ont évalué l'effort mental (charge cognitive), le niveau de coopération entre les élèves et, immédiatement après l'activité, leurs apprentissages. Enfin, les apprentissages à moyen terme ont été mesurés à nouveau six semaines plus tard.

L'analyse des résultats a permis d'identifier différentes catégories d'élèves en fonction de la charge cognitive déployée durant les activités de laboratoire et des autres variables mesurées. Tous les élèves ont démontré des gains d'apprentissage entre le prétest et le post-test, peu importe la catégorie de charge mentale où ils se trouvaient, et ces gains se sont maintenus plusieurs semaines après l'activité. Par contre, en comparant les résultats des différentes catégories d'élèves à divers

moments de l'activité, les chercheurs constatent la nécessité de mieux préparer certains d'entre eux à une activité de laboratoire, en particulier ceux qui vivent une telle expérience pour la première fois et ceux qui ont peu d'expérience préalable, ainsi que ceux qui ont une faible tolérance à l'incertitude et des connaissances préalables insuffisantes. Il en ressort que ces élèves bénéficieraient d'une meilleure préparation, d'un meilleur accompagnement et d'une approche plus « granulaire » des travaux de laboratoire (meilleur séquençage des activités et meilleur étayage). D'autre part, lors de la phase d'interprétation des résultats, à la fin des expériences, quelques élèves ont eu plus de difficulté à lier les aspects procéduraux et théoriques en génie génétique, ce qui s'est traduit par une forte surcharge cognitive. Ces élèves devraient donc bénéficier d'un meilleur étayage lors de cette importante étape, où les apprentissages pratiques et théoriques devraient converger dans l'esprit des élèves.

Langheinrich et Bogner (2015) ont conçu un module informatique (*eLearning*) présentant la structure de l'ADN en 3D dans le cadre d'expériences en génétique dans un laboratoire situé hors des murs de l'école. L'activité de laboratoire, durant une journée entière, comprenait quatre séances d'enseignement : une introduction aux activités de laboratoire (manipulation des équipements, sécurité, etc.), deux expériences pratiques de type « mains-à-la-pâte » (extraction et séquençage de l'ADN) et une activité d'enseignement virtuel utilisant le module *eLearning*. Le but de cette dernière activité était de fournir aux élèves les éléments conceptuels nécessaires à l'interprétation des résultats obtenus au cours des deux expériences précédentes.

L'étude a été menée auprès de 182 élèves bavarois de 11^e année (âgés en moyenne de 16,9 ans). Les chercheurs ont récolté des données à trois reprises (avant l'enseignement, tout de suite

après et neuf semaines plus tard) en demandant aux élèves de dessiner et de décrire une section d'une chaîne d'ADN. L'analyse montre des gains significatifs en termes d'apprentissage, malgré une légère baisse au niveau de la rétention à moyen terme. Un groupe témoin qui n'a pas participé à l'expérience et qui n'a pas non plus reçu d'enseignement en génétique ne montre aucun gain entre un prétest et un post-test effectués à cinq semaines d'intervalle. En dépit de ces bons résultats, les auteurs déplorent tout de même que la hiérarchie de l'organisation génétique aux niveaux moléculaire et cellulaire, de l'ADN à la cellule via les chromosomes, demeure un concept difficile à maîtriser pour plusieurs élèves.

Enfin, Goldschmidt et Bogner (2016) ont étudié l'influence de la motivation des élèves à apprendre des concepts scientifiques sur leurs apprentissages effectifs, de même que l'efficacité pédagogique (combinaison des apprentissages et de la charge cognitive) d'une intervention éducative dans un laboratoire situé en milieu universitaire sur les garçons et les filles. L'étude a eu lieu dans le même laboratoire que les recherches de F. X. Bogner décrites précédemment. Cette fois-ci, 197 élèves bavarois de 10^e année, âgés de 15 à 18 ans, y ont participé. Au laboratoire, une journée d'activités et d'expériences a été consacrée au maïs génétiquement modifié. Les chercheurs ont mesuré la motivation des élèves envers l'apprentissage des sciences, leurs apprentissages de même que leur charge cognitive avant, après l'intervention au laboratoire, puis à nouveau six semaines plus tard.

Les résultats indiquent une amélioration significative des apprentissages à court et à moyen terme avec des tailles d'effet de moyennes à grandes ; ce sont les élèves très motivés qui ont obtenu les notes les plus élevées. En outre, les chercheurs ont constaté des différences significatives entre les genres en

termes d'apprentissage et d'efficacité pédagogique, les filles démontrant une augmentation de leurs connaissances plus importante que celle des garçons, ce qui entraîne aussi une plus grande efficacité pédagogique pour elles, avec des tailles d'effet de faibles à moyennes. Ces résultats suggèrent que l'engagement actif dans des activités pratiques de laboratoire est particulièrement bénéfique pour les filles. Les auteurs recommandent donc d'améliorer la qualité et la quantité des expériences de laboratoire proposées aux élèves dans le cadre de l'enseignement de la biotechnologie, afin de surmonter d'éventuelles différences entre les genres pour l'apprentissage de cette matière.

Rouzière et Redman (2011) ont proposé à 8 élèves anglais de 12^e année (âgés de 17 ans) de participer à une série d'expériences de laboratoire de type « résolution de problèmes » au cours de laquelle ils devaient identifier une plante-mystère grâce à son ADN. Ces activités de laboratoire devaient permettre aux élèves d'effectuer une électrophorèse sur gel afin de révéler l'ADN de diverses plantes connues pour ensuite les comparer à l'ADN de la plante-mystère et l'identifier. Dans un laboratoire d'enseignement, les élèves ont donc échantillonné plusieurs plantes, amorcé des réactions en chaîne par polymérase pour amplifier l'ADN et ont chargé les échantillons ainsi préparés sur un gel d'agarose. L'atelier était découpé en deux sessions de 2,5 heures chacune, réparties sur deux jours. Les principaux défis pour les élèves étaient liés à l'utilisation de techniques et d'équipements peu familiers, comme des micro-pipettes, en particulier au stade du chargement sur le gel.

Les élèves ont apprécié l'activité : ils affirment avoir beaucoup appris à propos de l'ADN et du travail en laboratoire (propos autorapportés recueillis grâce à un questionnaire rempli à la fin de l'expérience) et que cette activité a augmenté leur

intérêt envers les sciences et les carrières scientifiques. Les auteurs remarquent par contre que les résultats des expériences et des manipulations n'étaient pas toujours concluants (par exemple, ceux de l'électrophorèse ont été difficiles à analyser) et que cela était en partie lié à certaines opérations difficiles à réaliser par les élèves, comme l'utilisation de micropipettes, ainsi qu'au manque de temps pour terminer l'électrophorèse. Cela illustre le fait que les séances en laboratoire doivent être planifiées avec soin et qu'il est important de laisser le temps aux élèves de se familiariser avec les techniques et les instruments. Malgré cela, le retour de la part des participants a été généralement positif, la majorité d'entre eux estimant que les expériences vécues en laboratoire se sont révélées agréables, éducatives et formatrices.

Bigler et Hanegan (2011) ont recruté 218 élèves étasuniens du secondaire afin de comparer un enseignement de type « mains-à-la-pâte » dans un laboratoire de biotechnologie à un enseignement plus magistral en classe. Les élèves du premier groupe (traitement) ont participé à un projet collaboratif intitulé « *Project Crawfish* », d'une durée de cinq à six jours, qui fait intervenir enseignants du secondaire et chercheurs universitaires et dont l'objectif est l'étude des différences génétiques entre divers organismes vivants. Dans le cadre de cette étude, les élèves ont analysé l'ADN d'une plante herbacée, d'une écrevisse, d'une grenouille et d'un ver. Une série d'expériences de laboratoire, visant à apprendre aux élèves les techniques de base de l'extraction de l'ADN et de l'électrophorèse sur gel, la réaction en chaîne de la polymérase (PCR), le séquençage de l'ADN, la bio-informatique et la phylogénétique, ont été effectuées. L'autre groupe (contrôle) a étudié ces mêmes concepts et techniques en classe en assistant à des présentations, en participant à de courtes activités centrées

sur des sujets liés à la génétique, notamment la structure de l'ADN, la réplication, les mutations, et en engageant quelques discussions sur les technologies génétiques appliquées, telles que le clonage et la thérapie génique. Les élèves de ce second groupe ont eu peu d'occasions de manipuler du matériel, sauf dans le cadre d'une activité d'électrophorèse qui n'était pas reliée aux autres unités d'enseignement développées pour la présente étude.

Les chercheurs ont recueilli des données à l'aide d'un questionnaire pré- et post-intervention, ainsi qu'à l'aide d'entrevues avec des élèves et des enseignants. L'évaluation portait sur des questions relatives non seulement à l'acquisition de connaissances par les élèves sur les procédés et équipements biotechnologiques utilisés, mais aussi à leur compréhension de la finalité de chaque étape des expériences en biotechnologie auxquelles ils ont participé. L'analyse des réponses indique que les élèves des deux groupes montrent des gains d'apprentissage après l'enseignement, mais que les élèves qui ont vécu l'expérience en laboratoire semblent avoir appris davantage que ceux du groupe témoin (les auteurs utilisent la valeur p – valeur quantifiant la significativité des résultats –, comme moyen de comparaison, plutôt qu'une taille d'effet). Les chercheurs croient que ce meilleur résultat est probablement dû au fait que l'intervention en laboratoire offrait plus d'occasions d'apprendre par la pratique (*hands-on*) et de possibilités de transfert de connaissances.

Jarrett *et al.* (2016) présentent les résultats d'une vaste étude ayant impliqué plus de 12 000 élèves étasuniens du secondaire sur une période de quinze ans dans une activité de laboratoire intitulée « *Sickle cell anemia : tracking down a mutation* ». Cette activité dure une journée entière et est basée sur l'apprentissage par l'enquête (*inquiry-based learning*). Dans le cadre de

cette activité, après une séance de présentation, les élèves (répartis en équipes de 6 et guidés par un facilitateur) utilisent diverses techniques génétiques, comme la digestion par endonucléase de restriction, l'électrophorèse sur gel d'acétate de cellulose et la microscopie, pour découvrir lequel de trois patients fictifs présente le génotype/phénotype de la drépanocytose. L'évaluation des apprentissages des élèves est faite à l'aide d'un pré- et d'un post-test, ainsi qu'à l'aide d'un système de réponse (système de claquoirs, ou *clickers*) et d'un jeu en grand groupe mené après l'activité.

De grandes différences sont apparues entre les résultats du pré- et du post-test, montrant des gains en apprentissage potentiellement importants de la part des élèves. Malheureusement, aucune donnée statistique ne permet de dire si les différences constatées sont significatives ni quelles en sont les tailles d'effet. Selon les auteurs, l'approche fondée sur la recherche et la résolution de problèmes dans une situation concrète facilite la compréhension par les élèves des concepts de base en génétique cellulaire et moléculaire, tout en leur permettant de se familiariser avec les outils de la biotechnologie contemporaine.

Chowning *et al.* (2019) décrivent une version modifiée du protocole traditionnel d'extraction de l'ADN menée dans un laboratoire scolaire qui favorise la participation des élèves à la conception du protocole expérimental et qui met également l'accent sur les importantes dimensions sociales de l'argumentation en science. À l'aide de divers indices inscrits sur des cartons (par exemple, les propriétés de l'éthanol favorisant l'extraction de l'ADN), des élèves étasuniens du secondaire ont d'abord été invités à réfléchir à diverses façons d'extraire l'ADN de cellules de fraises, puis à proposer un protocole de leur cru qu'ils devaient justifier de manière scientifique en se basant sur

les indices qui leur avaient été fournis. Puis ils ont été conviés à tester leurs idées en laboratoire et à documenter leurs procédures et les résultats obtenus. Un retour en grand groupe a permis ensuite de comparer les approches, grâce aux données recueillies par les élèves, et de déterminer la meilleure façon d'extraire l'ADN des cellules végétales.

Les chercheuses n'ont pas évalué systématiquement les apprentissages réalisés par les élèves, sinon en récoltant de manière informelle les impressions des participants. Les commentaires rapportés sont tous très positifs, insistant en particulier sur l'importance du travail d'équipe, de la liberté laissée aux élèves dans le développement de leur protocole et sur l'importance de considérer tous les résultats, positifs et négatifs, pour former son opinion. Les enseignantes responsables des élèves ont aussi remarqué le haut degré de concentration et d'engagement de ces derniers dans la tâche, de même que la qualité de leur travail collaboratif. Les auteures concluent qu'en redéfinissant une simple activité d'extraction d'ADN en laboratoire afin de mettre l'accent sur la conception de protocoles par les élèves eux-mêmes et sur leur évaluation des résultats basée sur des preuves empiriques, ces derniers ont l'occasion de s'engager dans un véritable processus collectif de résolution de problèmes et d'investigation scientifique. Ils peuvent développer leurs compétences en matière de communication (au moment du partage des procédures et des résultats), ainsi qu'en matière de critique constructive et d'amélioration des approches expérimentales proposées par différentes équipes. Les chercheuses croient que, grâce à ce type d'expériences, les élèves développent une meilleure compréhension du travail des scientifiques et une meilleure appréciation des compétences requises pour réussir un projet de recherche en science.



Gregor Johann Mendel (1822-1884)

Inclusion de l'histoire des sciences et de la nature de l'activité scientifique dans l'enseignement de concepts en génétique

L'inclusion de références historiques dans l'enseignement des sciences et d'une réflexion épistémologique sur la nature de l'activité scientifique (NAS, ou *Nature of Science* – NOS – en anglais) et de la production de nouvelles connaissances permet de contextualiser les apprentissages et d'améliorer la littératie scientifique des élèves (Abd-El-Khalick et Lederman, 2000 ; Dass, 2005 ; Irwin, 2000 ; Jenkins, 1994 ; Matthews, 1994 ; Monk et Osborne, 1997). En outre, d'après Matthews (1994), l'utilisation de l'histoire des sciences pour contextualiser l'enseignement de cette matière offre aux élèves la possibilité d'une plus grande réflexion, de discussions plus riches et de jugements critiques plus approfondis quant aux thèmes liés à l'enseignement.

Kim et Irving (2010) ont souhaité explorer ces idées dans le cadre de l'enseignement de la génétique en se demandant si une présentation des concepts scientifiques dans leur contexte historique allait avoir un effet positif sur l'apprentissage en génétique d'élèves étasuniens de 10^e année, ainsi que sur leur compréhension de la NAS. Le groupe traitement a donc suivi un enseignement dans lequel le contexte historique était largement mis de l'avant, tandis que le groupe témoin a étudié les mêmes concepts, mais sans contextualisation historique. Trois prises de mesure ont été effectuées : un prétest, un post-test et un post-test avec délai, deux mois après la fin de l'enseignement. Les résultats indiquent que les élèves du groupe traitement (contextualisation historique) ont développé une meilleure compréhension de certains aspects clés de la NAS immédiatement après l'intervention et l'ont conservée jusqu'à deux mois après l'intervention. Les deux groupes ont cependant atteint un niveau de connaissances similaire en génétique

après l'intervention. Par contre, ces connaissances ont subi une légère diminution pour les deux groupes au moment du post-test deux mois plus tard. Au niveau des apprentissages en génétique, l'approche historique n'a donc ni aidé les élèves du groupe traitement ni ne leur a nui, bien que cela ait nécessité pour eux de suivre un enseignement plus long que les élèves du groupe témoin.

D'ailleurs, en entrevue, les élèves du groupe traitement ont précisé avoir vu autant d'avantages que d'inconvénients à appliquer une approche historique à l'étude de la génétique, mais ils ont reconnu l'importance de connaître le contexte historique dans lequel les savoirs ont été découverts; ils ont aussi dit avoir aimé comprendre de quelle manière la science se fait et comment les connaissances se développent. Les résultats de cette recherche suggèrent que l'enseignement historique offre un cadre pédagogique riche permettant d'intégrer la NAS dans l'apprentissage des contenus notionnels à l'étude. Selon les chercheurs, il faut par contre réunir deux conditions pour assurer le succès de cette approche : le contexte historique doit être étroitement lié au contenu notionnel étudié et les élèves doivent avoir plusieurs occasions de réfléchir et de discuter des aspects historiques et épistémologiques des savoirs à apprendre. Bien que cette méthode ne se soit pas traduite par de meilleurs apprentissages en génétique de la part du groupe traitement et qu'elle ait demandé un peu plus de temps de préparation et d'heures d'enseignement de la part de la personne enseignante, les auteurs concluent : « [...] *using classroom time for history of science is not a waste of time but is valuable for providing students with an insight into how science works while maintaining significant achievement in the science content area* » (p. 212).

Lin, Cheng et Chang (2010) ont étudié l'effet de l'inclusion de vignettes historiques à propos de la génétique mendélienne

sur la compréhension, par les élèves, de la NAS et sur leur attitude envers les sciences à l'aide de deux questionnaires. Les chercheurs ont réparti 329 élèves taiwanais de 7^e année en deux groupes. Le groupe témoin a étudié la génétique classique à l'aide d'un manuel scolaire, tandis que le groupe traitement a utilisé le manuel, ainsi qu'une vingtaine de vignettes historiques présentant les principales découvertes scientifiques en génétique, depuis celle des cellules en 1665 jusqu'à la reconnaissance des travaux de Mendel au début du XX^e siècle. L'intervention éducative dans le groupe traitement comprenait également des discussions entre élèves et enseignants au sujet de ces vignettes. Celles-ci insistent sur le caractère collectif du travail des scientifiques, sur les petites découvertes faites par plusieurs chercheurs et qui en s'accumulant mènent à des découvertes majeures, ainsi que sur le caractère interrelié et non linéaire de la recherche scientifique, où théorie, observation et expérimentation sont en interaction constante.

Les résultats montrent un net avantage pour le groupe traitement (vignettes historiques) en ce qui concerne la compréhension de la NAS par les élèves et leur attitude envers les sciences. Les chercheurs recommandent donc de contextualiser l'apprentissage des concepts scientifiques en les replaçant dans leur contexte historique, ce que les manuels scolaires peinent à faire puisqu'ils présentent souvent les savoirs scientifiques de manière morcelée et les uns à la suite des autres, comme des produits finis, sans établir de liens entre eux, ni en montrant comment l'évolution de nombreuses idées à travers le temps a permis d'en arriver à nos connaissances actuelles.

Khishfe (2012a) s'est intéressée à la relation entre un enseignement explicite de la NAS et le processus de prise de décision d'élèves du secondaire vis-à-vis des OGM alimentaires. Rappelons que selon Sadler, Chambers et Zeidler (2004), l'idée

qu'une personne se fait de la NAS affectera son interprétation des savoirs scientifiques et la façon dont elle prendra des décisions concernant les questions socioscientifiques. Pour son étude, la chercheuse a recruté 90 élèves étasuniens de 9^e année, âgés en moyenne de 14 ans. Un groupe traitement a reçu un enseignement portant sur le génie génétique (plus spécifiquement les techniques de clonage appliquées aux aliments) et sur la manière de formuler des arguments et de prendre des décisions par rapport à une question controversée, incluant la formulation d'arguments basés sur divers aspects de la NAS. Le groupe témoin a suivi le même enseignement, mais sans insistance particulière sur la NAS.

La compréhension des élèves des deux groupes de ce qu'est la NAS et de ses diverses composantes, de même que les mécanismes de prise de décision qu'ils ont déployés, a été évaluée avant et après l'enseignement à l'aide de questionnaires et d'entretiens semi-dirigés. Après l'activité, les élèves du groupe traitement ont démontré une meilleure compréhension de la NAS et ont utilisé davantage d'arguments scientifiques liés à la NAS dans leur processus de prises de décision concernant les aliments OGM que ceux du groupe témoin, qui ont utilisé davantage d'arguments moraux et éthiques. Par contre, aucune différence n'est apparue entre les deux groupes quant à la position à adopter concernant les OGM (c.-à-d. pour ou contre les OGM). Ces résultats soutiennent l'idée selon laquelle une meilleure compréhension de la NAS par les apprenants influencerait positivement leur processus de prise de décision et qu'il est possible pour des élèves du secondaire d'appliquer divers aspects de la NAS à des situations de la vie réelle pour prendre des décisions au sujet de questions socioscientifiques controversées.

La même auteure (Khishfe, 2012b) s'est penchée sur la relation entre la compréhension qu'ont des élèves du secondaire de

divers aspects de la NAS et leurs compétences argumentatives par rapport à deux questions socioscientifiques controversées. Cette étude a été menée au Liban et a impliqué 219 élèves de 11^e année, âgés en moyenne de 16 ans. Les élèves ont été invités à répondre à un questionnaire qui leur présentait deux scénarios à propos des OGM et de la fluoration de l'eau. Pour chacun des scénarios, les élèves devaient développer un argument, un contre-argument et une réfutation, ainsi que les justifier. La seconde partie du questionnaire demandait aux élèves de présenter leur propre point de vue sur trois aspects de la NAS qui, selon Zeidler *et al.* (2002), sont étroitement liés aux questions socioscientifiques. Les participants n'avaient reçu aucun enseignement préalable à propos de la NAS ou de l'argumentation. Une trentaine d'élèves ont aussi participé à un entretien semi-dirigé au cours duquel on les a invités à expliquer leurs réponses au questionnaire plus en détail.

L'analyse des résultats concernant les OGM montre que moins de 20 % des participants ont formulé des arguments, contre-arguments et réfutations accompagnés de justifications valables et étayées par plus d'une raison. En ce qui concerne la NAS, 46 % des participants ont exprimé une opinion éclairée sur l'aspect subjectif de l'activité scientifique, tandis que la majorité a exprimé des opinions naïves sur les caractères évolutif et empirique des connaissances scientifiques.

Dans cette étude, le scénario concernant la fluoration de l'eau semble avoir suscité plus d'intérêt chez les élèves et activé plus de connaissances préalables, de sorte qu'ils ont été en mesure de réfléchir plus profondément à la question, ce qui aurait pu rendre les différents aspects de la NAS plus significatifs pour eux. Il semble donc qu'il serait idéal d'aborder des enjeux en lien avec les croyances des élèves et des situations qui affectent directement leur vie quotidienne pour leur

enseigner la NAS et l'argumentation. L'auteure suggère, par conséquent, de les exposer à des questions socioscientifiques concernant des contextes qui leur sont familiers, afin de favoriser chez eux le développement de leur compréhension de la NAS et de leurs compétences argumentatives. De ce point de vue, la question des OGM serait trop éloignée du quotidien des élèves et de leurs préoccupations personnelles pour pouvoir jouer un tel rôle.



Développement des compétences argumentatives à propos de questions socioscientifiques en génétique

Les compétences argumentatives représentent la capacité d'un individu à contextualiser ses connaissances dans le but de justifier une décision. Ces compétences s'appuient sur l'habileté à analyser des informations, à évaluer des preuves et à développer et présenter des arguments pour prendre une décision en toute connaissance de cause (Foog et Daniel, 2013). Apprendre à débattre et à argumenter à propos de questions socioscientifiques (QSS, on parle aussi parfois de questions socialement vives en science) fait partie des objectifs de la plupart des programmes scolaires. Dans le Programme de formation de l'école québécoise pour le secondaire, une des neuf compétences transversales s'intitule justement « Exercer son jugement critique » ; cette compétence vise à amener l'élève à se faire une opinion, à l'exprimer, mais aussi à la relativiser en la comparant à celle de ceux qui l'entourent (voir ministère de l'Éducation du Québec, 2006, p. 40-41 ; ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007, p. 9-10).

Bien qu'il soit généralement reconnu qu'il existe un lien entre le développement des compétences argumentatives des élèves et leur compréhension de concepts scientifiques (Dawson et Schibeci, 2003 ; Sadler et Fowler, 2006 ; Sadler et Zeidler, 2005), le sens dans lequel s'établit cette relation dans le domaine de la science n'est pas clair. D'un côté, le degré de compréhension d'une personne par rapport à un sujet scientifique peut influencer la qualité et la complexité des arguments qu'elle développera. Inversement, le fait pour une personne d'être impliquée dans un débat à propos d'une QSS peut influencer sa compréhension du sujet. Il est aussi important de tenir compte des intérêts et des préférences des élèves, qui

peuvent être différents de ceux des enseignants. Par exemple, dans une étude menée en Afrique du Sud, Mamombe, Kazeni et de Villiers (2016) ont constaté que les enseignants avaient tendance à privilégier des sujets d'enseignement et d'apprentissage à propos de la génétique associés au domaine social (culture, questions de société), tandis que les élèves privilégiaient les situations personnelles (leur héritage génétique, celui de leurs amis), les trouvant plus intéressants et pertinents pour eux.

Dawson *et al.* (2009) ont voulu savoir comment la représentation d'une courte pièce de théâtre (d'une durée de 10 minutes) suivie d'une discussion en petits groupes pouvait amener des élèves du secondaire à former leur opinion à propos des tests de dépistage génétiques. La pièce de théâtre, utilisée comme stimulus dans ce projet, parle d'un test génétique prédictif que doit subir un grand-parent appartenant à une famille étendue. La maladie visée par le test, la maladie d'Alzheimer précoce, est une maladie génétique à transmission autosomique dominante, ce qui signifie que si une personne possède le gène de la maladie, elle finira par la développer tôt ou tard dans le futur. Le drame tourne autour de la façon dont les différents membres de la famille pourraient être affectés par le résultat du test, s'il leur était communiqué.

La recherche a été menée auprès de 240 élèves anglais, âgés de 16 à 19 ans, répartis en groupes de dix élèves participant à un atelier de discussion après chacune des représentations. Des données ont été recueillies en observant les discussions tenues au cours des ateliers, mais aussi à l'aide d'une carte conceptuelle que chaque élève devait créer avant le début de la pièce, puis modifier et compléter (avec un crayon d'une autre couleur) après l'atelier de discussion. L'analyse des résultats a permis de constater que le format de l'atelier de discussion (d'une durée

de 40 minutes environ) suivant la représentation de la pièce de théâtre a permis aux élèves d'améliorer leur compréhension des questions personnelles et sociales entourant les tests génétiques, ainsi que leur compréhension et leur utilisation scientifiquement appropriée du langage et des concepts présentés durant la pièce et au cours de l'atelier.

Les chercheurs remarquent également que les élèves ont appris à développer et étayer leurs arguments et leurs connaissances sur ce qui a été présenté dans la pièce en utilisant le temps de discussion avec leurs pairs après la représentation. Les cartes conceptuelles, débutées avant la pièce de théâtre et complétées après l'atelier, contiennent un vocabulaire plus vaste, montrent une plus grande maîtrise des concepts et présentent des arguments plus nombreux et plus détaillés après l'atelier de discussion. Les élèves avaient clairement une meilleure compréhension des enjeux entourant les tests de dépistage génétiques après la pièce et l'atelier de discussion qu'avant.

Plutôt que le théâtre, Knippels, Severiens et Klop (2009) ont voulu étudier l'effet de l'utilisation d'extraits vidéo sur le développement des compétences d'élèves du secondaire en matière de formation de l'opinion à propos de QSS en génétique, en particulier la sélection génétique et le clonage d'embryons humains porteurs de traits souhaités par les parents. Près de 600 élèves hollandais de 11^e année (âgés de 15 et 16 ans) ont été répartis en deux groupes traitement. Dans un cas, les extraits vidéo présentés aux élèves montraient des situations tirées de films de fiction (par exemple, le film de science-fiction *Gattaca*), tandis que dans l'autre, il s'agissait d'extraits de reportages factuels (par exemple, des nouvelles à la télévision). Un groupe témoin a aussi été constitué et n'a reçu aucun enseignement à ce sujet. Les enseignants responsables des deux groupes

traitement (vidéo fictive ou factuelle) ont suivi une formation approfondie afin d'acquérir des compétences nécessaires pour aborder ces QSS en classe et de mener des débats argumentatifs de qualité avec leurs élèves. Des recherches préalables ont démontré l'importance de ce genre de préparation pour que les activités visant le développement des opinions des élèves soient le plus efficaces et sereines possible.

Le contexte des extraits vidéo était d'abord présenté, puis les élèves devaient écrire leurs premières impressions ; après quoi, des discussions en petits et grands groupes avaient lieu en classe. Par la suite, les élèves ont dû effectuer des recherches documentaires pour préciser les techniques génétiques illustrées dans les extraits et d'autres points soulevés lors des discussions. La formulation de questions morales et l'étude détaillée des conséquences sur les diverses personnes touchées par les situations décrites ont suivi. On a ensuite montré deux nouveaux extraits vidéo (fictif et factuel) à propos du clonage de chats en demandant aux élèves de se positionner pour ou contre. On a finalement invité les élèves à réfléchir et à expliciter quelles devraient être, selon eux, les étapes nécessaires à la formation d'une opinion éclairée sur des sujets sensibles comme le clonage.

Les deux groupes traitement ont été comparés au groupe contrôle et entre eux à l'aide d'une foule de données qualitatives et quantitatives. Il ressort de l'analyse comparant les résultats obtenus en pré- et post-intervention que les deux groupes traitement ont mieux réussi que le groupe témoin en ce qui concerne la formation d'opinion, tandis que le groupe qui a visionné des vidéos fictives a mieux réussi au post-test que le groupe factuel. En fait, il s'avère que seuls les résultats du groupe traitement « fiction » diffèrent significativement de ceux du groupe témoin ; les résultats du post-test

des groupes témoin et traitement « factuel » ne différant pas significativement.

Concernant l'aspect métacognitif du développement des compétences permettant de former une opinion, les deux groupes traitement ont mieux réussi que le groupe témoin, mais sans qu'il y ait de différence significative entre les deux groupes traitement. Par ailleurs, au niveau du nombre d'arguments proposés par les élèves, les deux groupes traitement dépassent le groupe contrôle et, là encore, c'est le groupe traitement « fiction » qui dépasse le groupe « factuel » de manière significative. Finalement, en ce qui concerne la capacité des élèves à discerner les éléments moraux autour de ces QSS, il n'y a pas de différence entre les groupes. Selon les chercheurs, la différence entre les deux groupes traitement pourrait être due au fait que les élèves du groupe fictif ont davantage apprécié l'extrait vidéo présenté, ou se sont davantage identifiés aux personnages du film, ce qui a entraîné une plus grande motivation et, par conséquent, une augmentation de leurs capacités de formation de l'opinion. Les chercheurs en concluent : « [...] *the materials used for the movie group stimulated students to develop a more founded opinion, which means they have taken more steps, and used more arguments in forming their opinion* » (p. 2078).

Toujours dans le but d'étudier l'effet de l'utilisation d'extraits vidéo sur le développement des compétences d'élèves du secondaire en matière de formation de l'opinion à propos de QSS en génétique, Boerwinkel, Knippels et Waarlo (2011) ont eux aussi utilisé des extraits vidéo (de une à deux minutes chacun), cette fois associés à trois situations de dépistage génétique présymptomatique dans le cadre du sport d'élite. Les dangers pour la santé et les coûts associés à l'entraînement des sportifs de haut niveau ont amené plusieurs organisations régissant ces

sports à exiger des tests génétiques préalables de la part des athlètes, afin de s'assurer qu'ils ne sont pas porteurs de gènes qui les mettraient davantage à risque (par exemple, un gène prédisposant à la maladie d'Alzheimer chez un aspirant-boxeur). Cependant, les tests génétiques présymptomatiques ne sont pas sans faille : ils présentent bien sûr des avantages et des inconvénients ; les multiples parties prenantes peuvent avoir des intérêts, ainsi que des réactions, divergentes quant aux résultats des tests ; et l'information génétique est souvent incertaine, ce qui peut générer des faux positifs.

Dans le contexte de l'étude de Boerwinkel, Knippels et Waarlo (2011), les facteurs de complexité associés aux tests de dépistage ont été illustrés à l'aide de trois vidéos présentées aux élèves. La première relatait le cas d'un sportif qui s'est écroulé durant un match de soccer après avoir subi une crise cardiaque (il était porteur d'une mutation génétique le prédisposant aux maladies cardiaques). La deuxième vidéo racontait l'histoire d'un nageur qui a été exclu des compétitions de manière préventive en raison d'une condition médicale similaire. La troisième vidéo montrait le site Internet d'une compagnie qui promeut un test génétique permettant de déterminer dans quel sport un enfant est le plus susceptible d'exceller, compte tenu de sa structure musculaire. Le but de ces présentations et de la discussion de classe qui a suivi était de vérifier si elles amèneraient les élèves à considérer plusieurs points de vue différents à propos des tests présymptomatiques et à inclure divers facteurs de complexité dans leurs arguments.

La séquence éducative, d'une durée de 40 minutes environ, a été testée en deux temps auprès de 138 élèves hollandais âgés en moyenne de 16 ans. Les chercheurs ont compilé des données à partir d'une fiche sur laquelle les participants étaient invités, après la présentation de chacun des trois cas, à indiquer

leur niveau d'accord avec l'utilisation des tests présymptomatiques dans le sport, à expliquer pourquoi (arguments) et à préciser quelles questions l'utilisation de ces tests soulevait dans leur esprit. Les chercheurs rapportent que les élèves qui étaient plutôt favorables à l'utilisation des tests après la première vidéo ont majoritairement revu leur position après la présentation des deux suivantes. Près de trois quarts des élèves ont changé d'avis plus d'une fois au cours de la leçon; bien que plusieurs soient finalement revenus à peu de choses près à leur position de départ, tous ont augmenté le nombre et la qualité des arguments offerts pour étayer leur opinion. La séquence éducative a également permis de développer davantage d'arguments pour ou contre les tests et a suscité un grand nombre de questions de la part des élèves, plusieurs concernant les facteurs de complexité associés aux tests de dépistage présymptomatiques. Les auteurs concluent en disant que leur stratégie éducative, basée sur des cas réels, s'est révélée un moyen efficace de sensibiliser les élèves à la question des tests génétiques. Selon eux, la sensibilisation est une première étape importante pour préparer les élèves à prendre des décisions sur des QSS liées à la génomique.

Venville et Dawson (2010) ont voulu étudier les liens entre le développement des compétences argumentatives des élèves du secondaire et leur compréhension de concepts en génétique. Leur étude a été menée auprès d'une centaine d'élèves australiens de 10^e année (âgés de 14 et 15 ans). Ces derniers ont été exposés à deux questions socioscientifiques, soit le dépistage de la fibrose kystique et la production de tomates OGM. Tous les élèves ont étudié les concepts en génie génétique prévus au programme scolaire régulier pendant dix semaines. Les élèves du groupe traitement ont discuté des QSS à trois reprises durant cette période, à raison d'environ 50 minutes chacune, tandis que les élèves du groupe témoin ont étudié

les mêmes concepts, mais sans pouvoir discuter des QSS. Les élèves du groupe traitement ont significativement mieux réussi au post-test que le groupe témoin, et ce, pour les trois aspects étudiés, soit leurs capacités d'argumentation, la qualité de leur raisonnement informel et leur compréhension des concepts en génétique. Les auteures concluent : « *The importance of the findings are that after only a short intervention of three lessons, improvements in the structure and complexity of students' arguments, the degree of rational informal reasoning, and students' conceptual understanding of science can occur.* » (p. 952)

Les deux mêmes chercheuses ont poussé plus loin leur analyse de ce qui s'était produit dans l'étude décrite ci-dessus en refaisant l'expérience avec le même enseignant et deux classes d'élèves australiens de 10^e année, âgés de 14-15 ans (55 élèves au total) ; les résultats ont été publiés dans Dawson et Venville (2010). Il s'agit donc du même enseignant et de la même approche favorisant le développement des compétences argumentatives des élèves et leurs apprentissages en génétique. L'analyse des notes prises par les chercheuses lors de leurs observations en classe, des transcriptions des leçons enregistrées sur bande audio, des productions écrites des élèves et de leurs entretiens avec ces derniers indique que les quatre facteurs suivants semblent avoir favorisé le développement des compétences argumentatives du groupe traitement : le rôle de l'enseignant dans la facilitation des discussions en classe ; l'utilisation de questions ouvertes posées aux élèves ; le thème de la QSS dont les élèves débattent ; et le rôle dévolu aux élèves.

En entrevue, les élèves sont très majoritaires à dire qu'ils ont apprécié les discussions en classe et affirment aussi avoir retenu bon nombre d'informations scientifiques à propos des thèmes débattus. Selon les chercheuses, il est par contre important de donner aux élèves le temps de s'approprier cette façon de faire,

qui n'est pas habituelle en milieu scolaire. Elles remarquent également que créer un climat propice à l'argumentation, c'est-à-dire serein, ouvert, harmonieux et constructif, dans la classe ne se fait pas du jour au lendemain ; à ce propos, l'enseignant participant à cette étude était considéré comme exemplaire par les deux chercheuses et n'est donc sans doute pas représentatif de la majorité des enseignants. Concernant le choix de la QSS qui a fait l'objet du débat, les auteures ajoutent que « [...] *the choice of socioscientific issue should be carefully selected by teachers and researchers to ensure that students have sufficient background knowledge to engage in argumentation. The issues should also be about topics likely to be of interest to the students* » (Dawson et Venville, 2010, p. 146).

Dawson et Venville (2013) ont ensuite cherché à savoir si le fait de donner aux élèves un enseignement explicite visant le développement de leurs compétences argumentatives améliorerait sensiblement leur capacité à argumenter de manière rationnelle, mais aussi leur capacité de raisonnement informel et leurs apprentissages en génétique. Les chercheuses ont d'abord formé cinq enseignants du secondaire aux techniques d'argumentation à propos de QSS en génétique (formation de deux heures), puis ces enseignants ont eux-mêmes formé leurs élèves (formations en classe d'environ trois heures). Deux cent quatre-vingt-treize élèves australiens de 9^e et 10^e années (âgés de 13 à 15 ans) ont participé à l'étude, en faisant partie soit d'un groupe traitement (formation à l'argumentation) ou d'un groupe témoin (sans formation à l'argumentation). Tous les élèves ont suivi un enseignement en génétique d'une durée de huit à dix semaines (une quarantaine de cours au total) couvrant le programme scolaire ouest-australien en génétique : reproduction sexuelle, mitose, méiose, transmission des traits, génétique mendélienne, gènes récessifs et dominants,

génotype et phénotype, carrés de Punnet, généalogie et maladies génétiques humaines.

À l'aide de divers instruments, les auteures ont recueilli des données sur les trois construits à l'étude (argumentation rationnelle, capacité de raisonnement informel et apprentissages en génétique) et leur analyse montre des gains significatifs pour les trois construits et des tailles d'effet élevées en faveur du groupe traitement (formation à l'argumentation), tant pour les compétences argumentatives, le raisonnement informel que les apprentissages (dans ce dernier cas, la taille d'effet était modérée). Ces résultats démontrent que le développement de compétences argumentatives dans le contexte de QSS en génétique a un impact positif et important sur les capacités de raisonnement et les apprentissages des élèves. Les auteures concluent en recommandant que l'enseignement mette l'accent sur « [...] *the importance of providing sound scientific evidence, questioning the source and validity of evidence, and encouraging students to anticipate and rebut claims and evidence* » (Dawson et Venville, 2013, p. 370).

Črne-Hladnik *et al.* (2012) se sont demandé si les connaissances préalables que possèdent les élèves à propos de la biologie moléculaire et de la biologie humaine influencent leur compréhension de la complexité des dilemmes éthiques relatifs à quelques applications en biotechnologie, comme le maïs et le saumon génétiquement modifiés ou les thérapies géniques. L'étude a été menée auprès de 429 élèves slovènes du secondaire, âgés en moyenne de 17 ans, qui avaient tous déjà suivi un enseignement en biologie humaine et moléculaire. La présentation des informations concernant les applications en biotechnologie a été faite par le biais de diaporamas (*PowerPoint*) et d'extraits de documentaires. À la suite de ces présentations, les élèves ont été invités à exprimer leur opinion au sujet des

biotechnologies décrites, du point de vue utilitaire, moral et de leur perception du risque, en remplissant un questionnaire conçu à cet effet.

Les chercheurs ont utilisé un prétest pour mesurer les connaissances préalables des élèves en biologie humaine et moléculaire et pour constituer deux groupes en fonction des résultats (score élevé contre score bas). Les différences entre les garçons et les filles ont aussi été étudiées et certaines ont été constatées en ce qui concerne la relation entre les connaissances préalables des élèves et leur avis à l'égard des applications biotechnologiques : les filles démontrant une meilleure perception des risques et de leur utilité. Les auteurs en concluent que les connaissances préalables des filles en génétique ont joué un rôle plus important dans leurs prises de position que celles des garçons.

Les autres résultats obtenus montrent que des connaissances préalables faibles de la part des élèves sont liées à l'emploi plus fréquent de raisonnements moraux intuitifs et émotifs, tandis que les élèves ayant un niveau de connaissance en génétique plus élevé utilisent des modes de raisonnements moraux plus rationnels. Les chercheurs émettent l'hypothèse que si certaines informations scientifiques de base sur les applications biotechnologiques n'avaient pas été fournies aux élèves au début de l'étude, le nombre de raisonnements moraux intuitifs et basés sur les émotions aurait probablement été plus important. Finalement, bien que les élèves aient démontré leur capacité à discuter de questions complexes au sujet des biotechnologies, les chercheurs notent la qualité relativement faible de leurs raisonnements, comme le montrent leurs brèves et trop peu nombreuses justifications (explications). Cela met en évidence, selon eux, le grand besoin de développer davantage les compétences argumentatives des élèves à propos des QSS en génétique.

Christenson, Rundgren et Höglund (2012) se sont aussi intéressés à l'utilisation par des élèves de la fin du secondaire de leurs connaissances scientifiques dans le développement d'arguments et la production de justifications relatives à quatre QSS, dont une en génétique. Quatre-vingts élèves suédois, âgés de 18 et 19 ans, ont été invités à exprimer leur opinion à propos de la QSS de leur choix par le biais d'un rapport écrit. La QSS en génétique concernait les OGM et les élèves devaient dire s'ils étaient d'accord pour que des OGM (plantes et animaux) soient produits et largement commercialisés dans leur communauté. Seulement onze des 80 élèves participants ont choisi de traiter de ce sujet (les autres thèmes étaient, par ordre décroissant de popularité, les changements climatiques, la consommation et l'énergie nucléaire). Les productions écrites des élèves ont été analysées en fonction de critères choisis par les chercheurs et issus de six domaines d'application liés aux QSS : sociologie et culture, environnement, économie, science, éthique et morale, et politique, le tout en lien avec les connaissances des élèves, leurs valeurs et leurs expériences personnelles.

Les résultats, tous thèmes confondus, montrent que les arguments basés sur les valeurs personnelles (morales) des élèves prévalent par rapport aux arguments basés sur leurs connaissances ou leurs propres expériences. Quant aux domaines d'application cités par les élèves, ceux liés à l'environnement et la science dominent. En ce qui concerne les OGM, c'est le domaine d'application « science » qui l'emporte largement, suivi par ceux de l'environnement et de la sociologie et la culture. Les chercheurs ont aussi découvert que plusieurs élèves fondaient leur opinion sur des connaissances scientifiques qui étaient en réalité des conceptions alternatives. Par exemple, dans le cas des OGM, un élève qui affirmait que les humains modifient les

espèces animales et végétales depuis toujours ne comprenait pas pourquoi les OGM faisaient débat au sein de la société. Cet élève ne faisait clairement pas la distinction entre l'amélioration des espèces par croisement et les techniques modernes du génie génétique. Cet exemple montre à quel point les enseignants doivent être à l'affût de la qualité et de la véracité des connaissances scientifiques que les élèves utilisent dans leurs arguments, et de leur maîtrise des concepts. Il arrive en effet parfois que ces derniers emploient des termes scientifiques dans leurs communications, mais sans vraiment en comprendre le sens ni la signification réelle.

Nielsen (2012a) s'est demandé comment les élèves utilisent et s'appuient sur différentes conceptions de la « nature » (un concept plutôt polysémique) dans leurs arguments à propos de QSS et jusqu'à quel point ils citent la science et les faits scientifiques dans leurs arguments. Le chercheur a, pour cela, analysé les discussions de huit groupes comprenant, chacun, quatre à cinq élèves danois, âgés de 16 à 19 ans. Les discussions, qui marquaient la fin d'une série de leçons de génétique, duraient chaque fois entre 40 et 60 minutes et portaient sur la question de savoir si la thérapie génique appliquée aux humains devait être permise ou non.

L'auteur remarque d'emblée que sur plus de 3300 prises de parole réparties sur les huit groupes de discussion, le mot « nature » ou des termes liés ne sont apparus que 70 fois. Cela semble peu, mais le chercheur a constaté que ces mentions ont joué des rôles clés non seulement dans les séquences d'argumentation dans lesquelles elles étaient contextualisées, mais aussi dans la dialectique globale des discussions. Cela dit, quand la nature était évoquée dans des arguments à propos de la thérapie génique, c'était pour dire que cette approche n'est pas naturelle, ou va à l'encontre des lois de la

nature. Les élèves se servaient donc de la nature comme d'un élément de jugement décidant de ce qui est permis de faire et de ce qui ne l'est pas en génétique. D'autre part, lorsque des arguments fondés sur la nature étaient exprimés par un élève, c'était rarement de manière élaborée et ses pairs ne demandaient pas à ce dernier d'expliquer ce que le concept sous-tendait ou signifiait pour lui. C'est dommage, car selon le chercheur, ç'aurait été l'occasion d'introduire des concepts et des faits scientifiques dans la discussion par le biais de l'appel à la « nature », et donc d'en faire des échanges argumentatifs dans lesquels le contenu factuel de la science deviendrait le principal enjeu. D'autre part, les élèves ne semblaient pas se restreindre à une seule interprétation du concept de nature ; sa signification semblant changer au gré de leurs besoins argumentatifs en cours de discussion.

Nielsen (2012b) a réutilisé la même approche que celle décrite ci-dessus pour étudier trois groupes de discussion en particulier, se demandant cette fois comment les élèves adoptaient différentes stratégies argumentatives impliquant soit des énoncés scientifiques factuels, soit des énoncés à caractère plus évaluatifs (c.-à-d. fondés sur des valeurs) dans le contexte d'une discussion à propos d'une QSS (la même que pour Nielsen, 2012a). Il s'est avéré que les élèves se servaient régulièrement de la science et des faits scientifiques pour faire croire que leurs arguments évaluatifs (valeurs) étaient plus solidement étayés que ceux de leurs interlocuteurs. De plus, ils avaient tendance à utiliser le contenu scientifique de manière à redéfinir ce que devait être, à leurs yeux, la question ou l'objet de la controverse. Ces résultats sèment le doute concernant la capacité des élèves à exposer correctement les faits scientifiques dans des activités d'apprentissage et d'argumentation en lien avec des QSS. Du point de vue des enseignants, cela signifie qu'il reste

encore beaucoup de travail à faire auprès des élèves pour les amener à bien faire la distinction entre faits scientifiques et valeurs personnelles.

Enfin, Nielsen (2012c) a utilisé à nouveau l'approche décrite ci-dessus pour étudier quels rôles argumentatifs les invocations du contenu scientifique jouaient dans les discussions de groupe, toujours à propos de la même QSS controversée, et quels effets ces invocations avaient sur la dialectique de la discussion. L'analyse des résultats suggère que le contenu scientifique a parfois joué un rôle informatif dans les tentatives d'établir le contexte factuel de certaines parties des délibérations. Toutefois, les élèves ont aussi souvent invoqué le contenu scientifique de manière « créative » et sélective dans leurs stratégies d'argumentation. Cela ressemblait alors davantage à une tentative de recadrer le sujet de la discussion d'une manière qui soit favorable à l'orateur. Les faits scientifiques devenaient ainsi une façon d'avoir raison, et non pas de faire avancer le débat sur des bases scientifiques. Cela nous ramène au besoin impérieux d'enseigner aux élèves les règles de base de l'argumentation fondées sur des faits scientifiques avant d'entreprendre ce genre de discussions.

Böttcher et Meisert (2013) ont voulu comparer l'effet d'un enseignement direct (dirigé) et d'un enseignement indirect (libre) sur le développement des compétences de prise de décision d'élèves du secondaire à propos d'une QSS concernant les OGM (le maïs génétiquement modifié, dans ce cas-ci). Les auteurs cherchaient à déterminer comment aider les apprenants à élaborer des protocoles suffisamment sophistiqués pour qu'ils parviennent à prendre des décisions raisonnables face à des sujets complexes. Ces protocoles incluent la capacité à réfléchir à leurs propres stratégies en fonction de la tâche à

accomplir, et à évaluer leurs stratégies et leurs décisions sur la base des informations disponibles.

Les chercheurs ont réparti 202 élèves allemands de 11^e année en deux groupes. Ils ont présenté au premier un protocole de prise de décision sophistiqué que les élèves devaient suivre à la lettre (enseignement dirigé). Ceux du second groupe devaient plutôt inventer leur propre protocole en tenant compte du contexte et des informations disponibles (enseignement libre). Dans les deux cas, la séquence d'enseignement a débuté par une phase de recherche documentaire à propos des OGM, des risques qu'ils présentent et des enjeux qu'ils soulèvent. La structure classique de l'argumentation a également été expliquée aux élèves. Ce n'est qu'ensuite que les deux groupes ont divergé dans l'approche éducative proposée (protocole dirigé ou stratégie libre). Des discussions en petits groupes de quatre à six élèves ont suivi au cours desquelles les arguments individuels ont été partagés et débattus, une étape importante dans le développement des compétences argumentatives des élèves, selon les chercheurs.

Ces derniers ont, par la suite, analysé ces discussions afin de déterminer la manière dont chacune des stratégies d'argumentation (protocole dirigé ou stratégie libre) a été comprise et appliquée ; ils ont aussi documenté les caractéristiques des stratégies déployées par les élèves et leur degré de complexité. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un protocole dirigé peut mener à une incompréhension du processus de prise de décision et entraîner un certain rejet de la part des apprenants. Il est en effet apparu que plusieurs élèves du groupe « dirigé » n'ont pas bien saisi certains des éléments clés de la stratégie présentée. Au contraire, les élèves ayant développé leur propre stratégie ont inventé des processus décisionnels complexes, trouvant des solutions de compromis

dans les cas où il fallait soupeser le poids relatif de plusieurs arguments contradictoires. Les chercheurs en arrivent à la conclusion qu'une certaine liberté laissée aux apprenants dans la mise en place de stratégies argumentatives est un bon moyen de favoriser le développement par les élèves de stratégies de prise de décision complexes vis-à-vis des QSS.

Dans le contexte particulier d'une classe malaisienne comprenant des élèves d'origine chinoise suivant un cursus scolaire d'inspiration confucéenne, Foong et Daniel (2013) ont cherché à évaluer jusqu'à quel point les compétences argumentatives des élèves, développées par le biais de l'étude d'une QSS, peuvent être transférées à une QSS différente. La recherche a été menée auprès de 35 élèves d'une même classe de 8^e année, âgés en moyenne de 14 ans. Une des deux QSS portait sur les aliments OGM et la seconde sur la déforestation. L'enseignement, basé sur le programme scolaire malaisien, a été enrichi d'une séquence de neuf activités conçues spécifiquement pour développer, chez les élèves, des compétences argumentatives. Ces activités, qui se sont déroulées sur environ un mois, incluaient des discussions de groupe, des lectures, de la recherche documentaire, une conférence animée par un spécialiste, ainsi qu'une formation à propos des techniques d'argumentation et de la bonne marche d'un débat. Rappelons que dans la philosophie éducative confucéenne, l'enseignement est essentiellement magistral, c'est-à-dire que l'enseignant parle et que les élèves écoutent.

À la fin de la séquence d'enseignement, lorsque la question des OGM était le sujet de l'apprentissage des élèves, on les a réunis en petits groupes et on leur a demandé s'ils accepteraient de manger des aliments OGM et si oui, pourquoi. Les élèves devaient d'abord en discuter entre eux avant de répondre individuellement à la question. Quelques jours

plus tard, les chercheurs ont répété le même exercice, sauf que cette fois, la QSS portait sur la déforestation et les élèves devaient dire s'ils étaient d'accord pour que l'on coupe des arbres afin de construire des maisons, des fermes et des usines. L'analyse des réponses des élèves, c'est-à-dire leurs décisions et leurs justifications à propos de la déforestation, montre une nette progression des compétences argumentatives de la classe dans son ensemble, ainsi qu'un net transfert entre les deux QSS (des OGM à la déforestation). D'un point de vue individuel, une majorité d'élèves ont proposé un plus grand nombre d'arguments en traitant de la question de la déforestation, ce qui démontre un net transfert de compétences argumentatives entre les deux QSS.

Berne (2014) s'est intéressée au développement de la réflexion éthique d'élèves suédois de 9^e année (âgés de 14 et 15 ans) en lien avec une QSS, soit les « bébés sur mesure » (*designer babies*), c'est-à-dire les bébés dont certaines caractéristiques génétiques, comme la couleur des yeux ou des cheveux, font l'objet d'un choix conscient de la part des parents ainsi que de manipulations génétiques. La chercheuse a étudié en particulier le rôle des discussions entre pairs dans le développement de cette réflexion éthique. Les 20 élèves participants avaient suivi un enseignement magistral à propos de la génétique six mois auparavant. La chercheuse (qui était aussi l'enseignante des élèves participants) a entamé l'activité en leur présentant le film de science-fiction *Gattaca* (voir Knippels, Severiens et Klop, 2009). Elle a ensuite fourni de la documentation variée à ses élèves, les a formés aux techniques et aux pratiques d'une bonne argumentation, et les a invités à se préparer à un débat qui serait organisé en classe deux jours plus tard. Les premières conversations entre élèves ont eu lieu en petits groupes, après quoi, chacun a dû

écrire un court texte (essai) à propos des arguments entendus et de leur propre position à propos des bébés sur mesure. Finalement, la chercheuse a évalué les connaissances de ses élèves ainsi que leurs compétences argumentatives.

Son analyse des arguments écrits avant et après les discussions entre pairs a révélé que nombre d'entre eux sont passés d'une argumentation axée sur les conséquences immédiates des bébés sur mesure à une réflexion à plus long terme, basée sur des considérations personnelles et sociales, ainsi que sur l'utilisation d'un langage plus scientifique. De plus, la majorité a abordé cet enjeu socioscientifique de multiples façons, en invoquant, par exemple, le jugement fondé sur les conséquences d'un geste (conséquentialisme), les droits de la personne, les devoirs envers les individus, l'éthique, ou encore d'autres aspects plus personnels liés à leur propre vécu. La progression des élèves en matière de réflexion éthique semble liée à la nature des interactions générées dans les discussions entre pairs. En effet, les élèves qui ont débattu de manière critique et constructive des idées des autres, et qui ont contesté les affirmations de certains en leur demandant d'appuyer leurs affirmations sur des faits, ont davantage progressé dans plusieurs aspects de la réflexion éthique que ceux qui n'ont fait que répéter, confirmer et approfondir sur ce que disaient les autres membres de leur groupe, sans véritable remise en question critique de ces propos. Ces résultats permettent de montrer l'importance de mener des discussions et des débats de qualité entre pairs à propos des QSS en lien avec la biotechnologie dans le contexte de l'enseignement des sciences à l'école.



Enseignement de la génétique assisté par ordinateur : programmes, jeux et plateformes informatiques

L'enseignement de la génétique est rendu difficile au secondaire par le fait qu'il est souvent impossible de proposer aux élèves des activités de laboratoire ou des activités de type « mains-à-la-pâte » significatives, ou bien de montrer en classe les processus dynamiques qui se déroulent aux différents niveaux d'organisation génétique, en particulier en raison du caractère microscopique des entités en jeu aux niveaux cellulaire et moléculaire. De plus, la lenteur relative des processus reproducteurs, qui permettraient d'étudier la transmission des traits d'une génération à l'autre, sans oublier la difficulté de conserver et de manipuler du vivant à l'école, rendent encore plus complexe ce type d'enseignement au secondaire.

Une des solutions est alors d'utiliser des programmes ou des plateformes informatiques, sur un ordinateur – en local ou en ligne –, permettant aux élèves de travailler sur divers phénomènes génétiques, à différents niveaux d'organisation, à leur rythme et de manière sécuritaire et peu coûteuse. Un bon exemple d'une telle plateforme est le didacticiel BioLogica™ (Concord Consortium, 2000). Les multiples interfaces offertes par ce logiciel éducatif relient dynamiquement les concepts et les processus de la génétique à différents niveaux d'organisation en s'appuyant sur l'exemple de la reproduction de dragons imaginaires. Le programme informatique permet à l'utilisateur de visualiser et d'étudier les gènes et les chromosomes dans les gamètes de parents dragons pendant la méiose, de sélectionner des gamètes pour la fécondation, d'examiner les caractéristiques de la descendance qui en résulte et d'utiliser ces informations pour observer la répartition des traits dans les générations successives de dragons. Sur son site Internet

(<https://biologica.concord.org/>), le Concord Consortium annonce malheureusement que BioLogica n'est plus maintenu par ses concepteurs, mais redirige le visiteur vers un site parent intitulé « *Teaching Genetics with Dragons* » (<https://concord.org/teaching-genetics/dragons/>). « *Teaching Genetics with Dragons* » apparaît donc comme le descendant de BioLogica.

L'objectif de l'étude de Tsui et Treagust (2010) en lien avec la plateforme BioLogica était d'abord et avant tout de développer un questionnaire à deux niveaux (réponses à choix multiples, puis justifications) sur des concepts en génétique (principalement la transmission des gènes, l'hérédité et la génétique mendélienne). Mais la recherche menée par les auteurs dans la troisième école où ils ont testé leur questionnaire et les données empiriques qui en découlent permettent d'analyser de manière indirecte l'apprentissage de contenu notionnel en génétique chez des élèves qui ont exploré les différentes représentations des phénomènes génétiques disponibles sur le didacticiel multimédia BioLogica.

Les 17 élèves participants à cette partie de l'étude de Tsui et Treagust (2010) dont nous rendons compte ici étaient australiens et étudiaient en 12^e année ; la comparaison des réponses au pré- et au post-test montre une augmentation significative de la qualité de leur raisonnement en génétique après leur utilisation fréquente et assidue de BioLogica. Les données recueillies au cours d'entretiens menés auprès des mêmes élèves à la suite de l'enseignement indiquent également que ces derniers ont trouvé BioLogica motivant et intéressant, surtout grâce aux visualisations variées et à la rétroaction rapide offerte par la plateforme. Des résultats partiels obtenus dans la première école où le questionnaire a été testé (dans une classe de 10^e année) révèlent une tendance similaire chez ces élèves plus jeunes ; nonobstant les activités d'enseignement survenues

dans cette classe, ces apprentissages peuvent aussi être associés en partie à leur utilisation de la plateforme BioLogica. Ce type de didacticiel informatique semble donc être une bonne façon de faciliter les apprentissages des élèves en génétique; les auteurs ajoutent qu'il est par contre important d'aider ces derniers à établir des liens explicites entre les manifestations extérieures de l'hérédité (phénotype) et les mécanismes sous-jacents invisibles (génotype), en particulier le rôle des protéines.

Kim *et al.* (2015) se sont eux aussi servis de la plateforme d'apprentissage et de modélisation BioLogica pour comparer deux approches d'enseignement de concepts en génétique auprès de 54 élèves singapouriens de 3^e secondaire (ce qui équivaut au secondaire 2 au Québec), répartis dans deux classes sous la responsabilité d'une même enseignante. Cette dernière et l'équipe de recherche ont conçu deux approches pédagogiques distinctes impliquant toutes deux une phase d'exploration où les apprenants utilisaient la plateforme BioLogica et une phase d'enseignement dirigée par l'enseignante et visant la consolidation des apprentissages des élèves. Dans la première classe, les élèves travaillaient d'abord en dyades en s'aidant de la plateforme informatique pendant plusieurs leçons, ensuite ils recevaient un enseignement magistral de la part de l'enseignante (enseignement dit successif); dans l'autre classe, chaque activité sur la plateforme était immédiatement suivie d'une leçon donnée par l'enseignante, formant ainsi une série de cycles d'enseignement mixte (enseignement dit cyclique ou intégré). L'activité a duré quinze jours au total, à raison de 80 minutes par jour. Les chercheurs ont mesuré les apprentissages des élèves à trois reprises à l'aide d'un questionnaire : avant le début de l'enseignement, au milieu et à la fin. L'enregistrement des conversations des élèves et des entretiens semi-dirigés avec certains d'entre eux a complété la collecte de données.

Les résultats de l'étude montrent que la progression des apprentissages était comparable entre les deux groupes traitement, sans différence significative, bien que les résultats des élèves ayant suivi l'enseignement cyclique ou intégré aient été supérieurs à ceux de l'autre classe. De plus, il s'avère que la qualité des conversations et la quantité des interactions entre élèves dans l'enseignement intégré ont dépassé celles de l'enseignement successif. Une des raisons pourrait être le fait que les élèves travaillant pendant plusieurs cours de suite à l'aide de BioLogica (enseignement successif) ne se sentaient peut-être pas à l'aise de discuter entre eux en classe, ce qui n'est pas la coutume dans les écoles singapouriennes. Cela pourrait signifier que la culture scolaire locale et la qualité des interactions au sein de la classe ont un effet important sur les apprentissages des élèves. D'autre part, il semble qu'une meilleure intégration des séances d'exploration de la plateforme informatique par les élèves et des leçons par l'enseignante, basée sur un dialogue constant entre élèves et avec l'enseignante, soit bénéfique pour l'apprentissage des élèves.

Annetta *et al.* (2009), quant à eux, ont évalué l'effet d'un jeu éducatif multijoueurs sur les apprentissages en génétique de 129 élèves étasuniens âgés de 14 à 17 ans (répartis à parts égales entre un groupe traitement et un groupe témoin) ainsi que sur leur engagement. Suite à une série de leçons approfondies en génétique utilisant diverses approches pédagogiques (lectures en grand groupe, activités de type « mains-à-la-pâte », discussions en petits et grands groupes et pratique individuelle), les deux groupes d'élèves ont réalisé un travail de révision selon deux modalités différentes : le groupe traitement en utilisant le jeu éducatif et le groupe témoin en appliquant une approche plus traditionnelle (travail de révision de type papier-crayon et discussions en grands groupes).

Le jeu éducatif était de type « meurtre et mystère » et les élèves devaient identifier la personne qui avait commis un vol dans un manoir dont les propriétaires venaient de décéder. Une vaste somme d'argent laissée en héritage avait été dérobée d'un coffre-fort, une goutte de sang avait été retrouvée sur les lieux du crime et un témoin visuel affirmait que le voleur avait une malformation du pouce, peut-être d'origine génétique. Grâce à un laboratoire d'analyse virtuel en ligne accessible dans l'espace de jeu, les élèves devaient conduire une série de tests génétique (ADN, héritage génétique) afin d'identifier le ou la coupable.

Les chercheurs ont constaté un net avantage du groupe « jeu » (traitement) du point de vue de l'engagement. Par contre, au niveau des apprentissages, aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes. Selon les auteurs, plusieurs raisons peuvent expliquer cette absence de différence : la présence d'un enseignant expérimenté (le même pour les deux groupes) qui aurait extrêmement bien formé tous les élèves, réduisant d'autant l'impact du jeu en tant que mode de révision, et la difficulté de mesurer les apprentissages dus au jeu à l'aide d'un instrument de type papier-crayon (questionnaire standardisé utilisé pour la recherche). Il est aussi possible que les jeux soient plus utiles lors de l'apprentissage des notions en génétique, plutôt qu'au moment de les réviser. Quoi qu'il en soit, le fait que le jeu ait davantage engagé les élèves dans l'activité demeure un élément positif que les chercheurs suggèrent de continuer à explorer dans le contexte de l'enseignement de notions complexes en génétique.

Gelbart, Brill et Yarden (2009) ont comparé une centaine d'élèves israéliens de 12^e année (âgés de 17 et 18 ans) répartis en deux groupes : un qui a suivi cinq cours en génétique à l'aide d'une plateforme en ligne reproduisant une étude authentique

en génétique (traitement) et l'autre qui a étudié les mêmes concepts de manière plus traditionnelle, à l'aide de manuels scolaires et de problèmes à résoudre en classe (témoin). Les données ont été recueillies grâce à un questionnaire de type « vrai ou faux » utilisé en pré- et en post-test, ainsi qu'en observant les conversations de quatre élèves du groupe traitement choisis au hasard et travaillant en dyades sur la plateforme en ligne. Cette plateforme, qui insiste sur les relations existantes entre les mécanismes moléculaires et cellulaires (au niveau de l'ADN et du génome) et sur la façon dont ces mécanismes mènent au phénotype d'un individu, permet aux apprenants d'appliquer leurs connaissances en génétique tout en leur donnant l'impression de participer à une étude génétique authentique à l'aide d'outils bio-informatiques véritables.

La comparaison des deux groupes au post-test a révélé une différence significative en faveur du groupe traitement en ce qui a trait à la capacité des élèves à répondre correctement au questionnaire et à fournir des explications justes pour motiver leurs réponses. Les auteurs concluent que l'utilisation par les élèves d'une simulation d'une recherche authentique en génétique les a amenés à trouver davantage d'explications causales et à faire davantage d'inférences, et que cela a eu un effet positif sur leurs apprentissages. Cela dit, lorsque les chercheurs ont analysé les réponses par groupes de questions en fonction de certains thèmes précis, ils ont découvert que les apprentissages étaient plus faibles pour le groupe traitement en ce qui concerne la génétique des populations et l'expression des gènes, même si ces thèmes étaient inclus dans la simulation.

En analysant les données qualitatives recueillies auprès des quatre élèves ayant travaillé sur la plateforme en ligne, dans le cadre d'entrevues menées à la suite de la recherche quantitative décrite ci-dessus, les chercheurs ont identifié deux types

d'élèves distincts : ceux qui agissent comme des chercheurs en génétique et qui adoptent les pratiques de recherche et l'heuristique des généticiens, et ceux qui s'arrêtent aux aspects procéduraux de la simulation afin d'obtenir la « bonne réponse » et de passer à l'activité suivante. Les premiers étaient investis dans la recherche scientifique et ont fait des apprentissages d'un point de vue épistémologique, tandis que les autres étaient davantage tournés vers les procédures (les tâches à accomplir). On peut voir dans ce dernier cas l'influence négative des travaux de type scolaire, qui consistent en une série de tâches à reproduire dans un temps limité pour atteindre un objectif fixé par l'enseignant. Furberg et Arnseth (2009) et Nielsen (2012c) avaient déjà signalé une telle difficulté dans le contexte de l'apprentissage de l'argumentation en classe.

Dans deux articles de Williams (Williams, Montgomery et Manokore, 2012 et Williams *et al.*, 2012) sont présentés les résultats d'une étude menée à l'aide d'un programme d'apprentissage en ligne intitulé « *Web-based Inquiry Science Environment (WISE)* » qui guide des élèves à travers une série d'activités de résolution de problèmes rencontrés dans la vie quotidienne. Les élèves qui utilisent la plateforme doivent régulièrement répondre à des questions qui servent à évaluer leurs apprentissages (*embedded assessment*). Grâce à un étayage constant, WISE cherche à développer les habiletés cognitives et métacognitives des élèves et à favoriser leurs apprentissages en génétique.

Dans le cadre de cette étude, 209 élèves étasuniens de 7^e année ont suivi les activités du module intitulé « Qui est le parent ? », d'une durée de cinq semaines, et qui les invitent à étudier trois générations de plantes pour découvrir les lois de l'hérédité. Au début du module, les élèves découvrent la photo d'une plante à tige violette. On leur montre ensuite la première

génération de descendants, aussi à tige violette, et on les met au défi de découvrir le phénotype et le génotype du second parent de la plante descendante, et ce, à partir des ratios de phénotype de la deuxième génération de plantes et en utilisant des carrés de Punnett. En parallèle, les élèves font pousser de vraies plantes dans la classe. À la fin du module, ayant idéalement développé une meilleure compréhension des lois de Mendel et de la manière dont l'information génétique est transmise des parents aux enfants, les élèves devaient répondre à la question de départ : « Qui est le parent ? »

En comparant les réponses des élèves avant et après l'activité à l'aide d'un questionnaire à choix multiples et à développement, les chercheurs ont constaté une hausse importante des connaissances générales des élèves en génétique, avec une très grande taille d'effet. Les chercheurs ont aussi étudié plus en détail les apprentissages liés à certains concepts précis, comme la division cellulaire et l'héritage génétique. Les conclusions qui se dégagent de leurs analyses sont que, malgré les gains importants enregistrés en termes d'apprentissage au niveau des processus cellulaires, plusieurs élèves avaient toujours de la difficulté à différencier la méiose de la mitose, d'une part, et à établir des liens entre ces deux processus biologiques, la structure cellulaire et sa fonction dans le transfert génétique, d'autre part, ainsi qu'à utiliser des carrés de Punnett pour prédire et expliquer l'aspect de la progéniture. En réalité, seuls les meilleurs élèves, ceux ayant obtenu les scores les plus élevés au post-test, semblent avoir été en mesure d'établir ces liens, ce qui met en évidence le besoin de créer des séquences d'enseignement qui aident encore davantage les élèves dans leur apprentissage de ces concepts complexes, surtout ceux qui sont moins forts sur le plan académique.

On sait que l'utilisation de modèles génétiques vivants en classe de secondaire, comme par exemple des souris transgéniques, est coûteuse et impraticable dans la plupart des cas, sans oublier les questions éthiques que cela soulève en lien avec les soins à apporter aux animaux. C'est pourquoi Shegog *et al.* (2012) ont créé une simulation informatique qui permet aux élèves de créer de toutes pièces une souris transgénique et d'explorer les causes et les traitements potentiels des maladies génétiques humaines sur un « modèle animal ». Une telle simulation informatique permet de profiter de tous les avantages du modèle vivant pour l'enseignement de concepts en biologie moléculaire, incluant la familiarisation avec les contenus notionnels et les protocoles de laboratoires associés, sans les inconvénients inhérents au maintien de souris dans un laboratoire scolaire, et d'ouvrir également l'accès de cette stimulation à un très grand nombre d'apprenants en même temps.

Les chercheurs ont testé leur modèle informatique de souris transgénique auprès de 44 élèves étasuniens de 11^e et 12^e année (âgés de 15 à 18 ans) répartis en deux groupes. Le groupe traitement l'a utilisé à deux reprises, tandis que le groupe témoin ne l'a utilisé qu'une seule fois. Dans les deux cas, le but de l'exercice était de créer une souris transgénique contenant un gène d'origine humaine en suivant toutes les étapes requises dans un laboratoire virtuel offrant aux élèves divers équipements et procédures expérimentales. À chaque étape, ces derniers devaient choisir les bons équipements et les bonnes procédures (par exemple, sélectionner un gène à étudier, le multiplier par une réaction en chaîne par polymérase, l'introduire dans l'animal, etc.), puis ils regardaient une vidéo commentée montrant un technicien de laboratoire en train de faire les manipulations.

Pour le groupe traitement, la prise de mesure a été faite en trois temps. Il y a eu un prétest avant la première utilisation du

modèle informatique, un post-test à la suite de cette première fois, et un nouveau post-test après la seconde utilisation. Le groupe témoin a lui aussi été testé trois fois, mais n'a utilisé la simulation qu'une seule fois entre la deuxième et la troisième prise de mesure. Les questionnaires évaluaient les connaissances procédurales et déclaratives des élèves en génétique, le temps passé à effectuer l'exercice, ainsi que leur attitude envers l'enseignement assisté par ordinateur et envers les carrières scientifiques.

Les résultats montrent que les élèves du groupe traitement ont significativement amélioré leurs connaissances procédurales entre leur première et leur seconde utilisation de la simulation, en faisant beaucoup moins d'erreurs et en diminuant le temps passé sur l'ordinateur avant d'atteindre leur objectif. Ces mêmes élèves ont significativement appris plus de choses que ceux du groupe témoin (une seule utilisation). Les élèves des deux groupes ont vu leur attitude envers l'enseignement par ordinateur s'améliorer, de même que leur attitude générale envers les sciences. Les résultats de cette étude soutiennent l'idée que l'utilisation d'une simulation informatique comme complément à l'enseignement de la biologie moléculaire et des procédures de laboratoire peut améliorer de manière significative les connaissances procédurales et déclaratives des élèves, leur attitude envers l'utilisation des ordinateurs pour l'apprentissage et envers la science en général.

Piksööt et Sarapuu (2014) ont analysé l'effet d'un questionnement ciblé, servant d'étayage, sur les apprentissages des élèves pendant qu'ils interagissent avec un programme informatique en ligne appelé « *Cell World* » (<http://bio.edu.ee/models>). Cet environnement virtuel a été conçu pour améliorer leur compréhension des processus biologiques complexes qui se produisent au niveau microscopique dans les cellules :

respiration, photosynthèse, expression des gènes, contraction des cellules musculaires, etc. Le but de la simulation est d'ajouter ou de remplacer des molécules pour reconstruire les processus biologiques et ainsi réussir à expliquer les interactions et les changements de propriétés des entités impliquées dans ces processus. Parmi les dix processus proposés par la plateforme, les chercheurs en ont retenu deux pour leur étude : le code génétique et la translation.

Au total, 503 élèves estoniens de 11^e année (âgés de 17 et 18 ans) y ont participé. Ils devaient interagir avec les modèles virtuels mis à leur disposition et, dans le cas des élèves du groupe traitement, répondre à une question à choix multiples qui avait pour but d'attirer leur attention sur une propriété centrale des molécules en jeu dans les processus biologiques. Une rétroaction du programme informatique permettait également aux élèves de corriger leurs erreurs au fur et à mesure de leur progression.

Les chercheurs ont comparé le nombre d'erreurs commises par les élèves des deux groupes, traitement et témoin (sans question) et constatent que ceux du groupe traitement font autant d'erreurs que ceux du groupe témoin lorsqu'il s'agit d'ajouter une molécule au processus, mais significativement moins lorsqu'il s'agit plutôt de remplacer une molécule par une autre. En comparant les résultats d'un pré- et d'un post-test, ils ont aussi montré un gain significatif des apprentissages en génétique et du transfert de connaissances pour les élèves du groupe traitement. Le questionnement ciblé au sein d'une séquence d'enseignement en ligne semble donc une bonne approche pour favoriser les apprentissages des élèves concernant des concepts complexes comme ceux de la génétique moléculaire.

Loftin *et al.* (2016) ont étudié l'impact d'un jeu sérieux intitulé « *Touching Triton* » sur la compréhension par les élèves des facteurs génétiques et environnementaux qui augmentent les risques pour un individu de développer une maladie multigénique. Les élèves étaient invités à endosser le rôle de spécialistes en ressources humaines chargés du choix des six membres d'un équipage d'astronautes appelés à s'envoler, dans le cadre d'une mission spatiale, vers Triton, une lune de Neptune. En se basant sur les dossiers médicaux qui leur sont soumis, contenant des données médicales, génétiques et les antécédents familiaux des candidats, les élèves devaient estimer le risque pour chacun de développer une maladie génétique quelconque au cours de leur séjour de vingt ans dans l'espace. Un expert virtuel, disponible à tout moment pendant le jeu, fournissait aux élèves les informations conceptuelles et procédurales dont ils avaient besoin afin de faire les bons choix.

Les auteurs ont étudié l'impact de ce jeu sur les apprentissages en génétique de 875 élèves étasuniens du secondaire à l'aide d'un pré- et d'un post-test comprenant des questions à choix multiples à propos des concepts présentés dans le jeu (il n'y avait pas de groupe témoin dans cette étude). Une évaluation de l'intérêt des élèves envers les sciences en général et les sciences à l'école a également été faite grâce à un sondage pré- et post-jeu. Dans les deux cas, la différence pré-post est positive et hautement significative, indiquant que les élèves ont fait des apprentissages importants au sujet des maladies multigéniques et que le jeu a suscité chez eux un grand intérêt envers les sciences en général et les sciences à l'école. Un aspect à ne pas négliger, selon les auteurs, est le fait que les élèves désiraient vraiment faire le bon choix de candidats pour le succès de la mission, une implication affective qui n'a pas été

mesurée spécifiquement, mais qui a été, d'après eux, un facteur de motivation important pour plusieurs participants.

Haskel-Ittah et Yarden (2017) ont utilisé une série de quatre leçons proposées dans un environnement d'apprentissage informatique pour amener des élèves israéliens de 10^e année à comprendre le rôle des protéines dans le mécanisme qui fait que les gènes (génotype) sont à l'origine des traits (phénotype). Les chercheurs se sont concentrés sur les protéines, car il a été démontré que, malgré leur rôle central dans tous les mécanismes génétiques, les élèves ont tendance à les ignorer ou ont de la difficulté à expliquer comment elles sont impliquées dans ces mécanismes (Duncan et Reiser, 2007 ; Gericke et Hagberg, 2007 ; Reinagel et Speth, 2016). Les quatre leçons portaient sur la génétique de la mouche à fruit (<https://stwww1.weizmann.ac.il/Igof/>) et servaient à établir graduellement et de manière visuelle le lien entre génotype et phénotype par l'entremise des protéines. Les données pré- et post-intervention ont été recueillies auprès de 38 élèves à l'aide de questions ouvertes, de cartes conceptuelles qu'on leur a demandé de réaliser, de l'analyse de leurs interactions avec la plateforme informatique, d'enregistrements audio captés pendant les leçons, de même que d'entretiens semi-structurés avec quelques-uns des élèves participants.

Avant d'utiliser l'environnement d'apprentissage informatique, la plupart des élèves avaient tendance à ignorer les protéines lorsqu'ils fournissaient des explications sur un phénomène génétique, se référant, par exemple, uniquement aux gènes dans le cadre de l'expression des traits. De plus, même lorsque les gènes étaient mentionnés, c'était seulement en raison de leur effet sur un phénotype, et non en tant qu'entités informationnelles faisant partie d'un mécanisme conduisant à l'expression de ce trait par le biais des protéines. Plusieurs élèves

ont inclus les protéines dans leurs cartes conceptuelles, mais en tant qu'entités apparaissant dans les processus génétiques, ce qui semble indiquer qu'ils ne saisissent pas bien le rôle de ces dernières.

Après avoir utilisé l'environnement d'apprentissage informatique, un plus grand nombre d'élèves ont mentionné les protéines dans leurs descriptions des mécanismes génétiques et ont été en mesure d'expliquer leur rôle. De même, un nombre significativement plus grand de cartes conceptuelles montrait des liens explicites entre les gènes, les protéines et les traits. Les enregistrements audio, l'analyse de l'utilisation de la plateforme par les élèves et les entretiens ont permis de constater que ce sont les représentations visuelles des protéines au sein des mécanismes reliant les gènes aux traits qui ont le plus facilité la compréhension par les élèves des relations entre ces trois éléments, et donc du mécanisme par lequel les gènes sont à l'origine des traits. Les auteurs en concluent qu'avec un enseignement magistral traditionnel, il manque un élément crucial dans la compréhension par les élèves du mécanisme génétique de l'expression des traits et que, sans une représentation visuelle explicite du rôle des protéines dans ce mécanisme, la compréhension des élèves demeurera superficielle. Par contre, cette étude démontre qu'avec des outils visuels et conceptuels bien conçus, même des élèves de 10^e année sont en mesure de s'approprier ces concepts.

Haskel-Ittah et Yarden (2018) ont poursuivi leur étude de la compréhension par les élèves du secondaire du rôle des protéines dans la transmission des traits en se demandant jusqu'à quel point l'existence de conceptions non mécanistes chez les élèves les empêchait de comprendre le mécanisme de la transmission des traits, mécanisme qui va des gènes aux traits en passant par les protéines. Les chercheurs qualifient

de non mécaniste une vision de la génétique où « les gènes *sont* les traits », ou encore « les gènes sont des entités porteuses ou composées des traits » ; il manque à cette vision le rôle de médiateur des protéines, formées en utilisant l'information génétique contenue dans les gènes pour donner naissance aux traits.

Leur étude a impliqué 198 élèves israéliens de 9^e et 12^e année. Dans un premier temps, ils ont été invités à créer des cartes conceptuelles à partir de huit mots-clés fournis par les chercheurs (gène, protéine, trait, chromosome, ADN, méiose, parents et descendants). Les élèves ont ensuite répondu à un questionnaire prétest (le même que dans l'étude de 2017), suivi un enseignement à propos de la génétique de la mouche à fruits (voir Haskel-Iltah et Yarden, 2017), puis rempli le même questionnaire en post-test. Le but des chercheurs n'était pas de suivre l'évolution des conceptions des élèves, mais plutôt d'établir un lien entre leur vision mécaniste ou non mécaniste de la génétique et leurs apprentissages en génétique durant le cours sur la mouche à fruits.

En analysant les résultats, les chercheurs ont constaté que les conceptions non mécanistes sont courantes chez les élèves avant leur étude des concepts de transmission des traits en génétique. Un tiers des élèves de 9^e année qui en étaient à leurs premiers cours de génétique ont décrit les relations entre les gènes et les traits d'une manière non mécaniste. Les chercheurs ont trouvé à peu près la même proportion de conceptions non mécanistes chez les élèves de 12^e année, ce qui suggère que ces conceptions non mécanistes se développent avant l'enseignement formel de la génétique et peuvent persister au-delà de cet enseignement.

Les chercheurs ont également remarqué qu'en 9^e et en 12^e année, les élèves possédant des conceptions non

mécanistes de la relation entre les gènes et les traits réussissaient moins bien que les autres élèves à apprendre les mécanismes médiateurs impliquant les protéines. Bien qu'ils aient suivi un enseignement spécifiquement conçu pour cibler la fonction des protéines en tant que médiateurs, ces élèves ne semblaient pas comprendre le rôle central de ces dernières dans les mécanismes génétiques. En revanche, les élèves qui avaient une conception mécaniste de la relation entre les gènes et les traits avant l'enseignement comprenaient bien la centralité des protéines. Cette différence entre les deux groupes d'élèves n'apparaît toutefois qu'à propos de l'apprentissage des mécanismes génétiques par lesquels les gènes déterminent les traits, et non à d'autres questions en génétique, comme les relations structurelles entre ces différents concepts. Les chercheurs en concluent que la conception d'un phénomène génétique de manière non mécaniste peut entraver l'apprentissage du mécanisme sous-jacent par les élèves.



Enseignement interdisciplinaire de concepts en génétique

On connaît les liens forts qui existent entre les mathématiques, la physique et la chimie, mais moins entre les mathématiques et la biologie. Il y a pourtant de nombreux problèmes très intéressants en biologie qui se prêtent bien à une résolution par le biais de l'utilisation d'outils mathématiques. Selon Cox *et al.* (2016), «[...] *viewing classroom biology in the context of another discipline [like mathematics] could support students' development of biology understanding [...]*» (p. 22). D'autre part, les démarches de l'ingénieur appliquées en classe de secondaire pour résoudre des problèmes liés au génie génétique permettent aussi aux élèves de faire des apprentissages en génétique tout en intégrant leurs nouveaux savoirs dans un contexte réaliste et stimulant (Mathis *et al.*, 2018)

Cox *et al.* (2016) ont ainsi conçu le projet *Biology Levers Out Of Mathematics* (BLOOM) afin d'aider les élèves à rapprocher la biologie et les mathématiques par le biais de la résolution d'un problème en génie génétique. Leur étude présentait aux élèves des problèmes de biologie et de génie génétique que les mathématiques permettent de résoudre plus facilement. Par exemple, les chercheurs constatent que, normalement, l'enseignement de la transmission des traits génétiques est centré sur la description de la méiose, et que le calcul des ratios des phénotypes des descendants se fait grâce aux carrés de Punnett. Mais cette façon de faire est complexe et les manipulations essentiellement techniques masquent rapidement la signification biologique de l'exercice. Les chercheurs se sont donc demandé si les élèves à qui l'on veut enseigner ces concepts apprendraient davantage, et mieux, si on leur proposait une autre manière d'envisager les problèmes de transmission des

gènes, une manière qui fasse intervenir les mathématiques, et non pas seulement la biologie.

En tout, 180 élèves étasuniens du secondaire, âgés de 14 à 18 ans, participaient à la portion qualitative de l'étude. Dans le cadre d'une activité de résolution de problèmes, on les a invités à agir en tant que consultants en reproduction animale pour un zoo qui souhaite obtenir des animaux rares afin d'augmenter le nombre de ses visiteurs. Le cahier des charges stipulait que les animaux devaient être de race pure pour que le zoo puisse par la suite poursuivre de façon autonome son programme de reproduction de ces animaux. Les élèves étaient donc amenés à se demander comment savoir ce à quoi ressembleront les descendants issus de la reproduction de ces animaux, et quelle proportion des descendants auront certains traits. L'un des objectifs de la recherche était de faire passer les élèves d'une explication qualitative de la transmission des traits à une explication quantitative susceptible de leur faire faire des prédictions chiffrées en ce qui concerne l'aspect des descendants. Ainsi, ils intégraient la biologie aux mathématiques autour des concepts de gènes et d'allèles, afin de fournir une explication scientifique prédictive de la reproduction et d'assimiler de nouvelles connaissances en génétique nécessaires pour répondre aux besoins du zoo.

Au début, plusieurs élèves ont ressenti de la frustration, puisque les mauvaises réponses qu'ils obtenaient n'étaient pas immédiatement corrigées, comme c'est le cas avec des problèmes mathématiques usuels. Mais des observations faites lors de l'avancée de l'étude montrent une importante baisse de l'anxiété lorsque leurs premiers succès sont apparus. À travers l'enseignement basé sur l'approche BLOOM, les mathématiques ont permis aux élèves de mieux comprendre et maîtriser la grande complexité des combinaisons d'allèles pour prévoir

les résultats de la reproduction, peu importe le nombre d'allèles en jeu, une facilité que les carrés de Punnett n'offrent pas dans la pratique.

D'un point de vue quantitatif (étude présentée en détail dans Schuchardt et Schunn (2015) et impliquant 745 élèves de 9^e et 10^e année dans le groupe traitement et 321 dans le groupe témoin), les élèves ayant participé au projet ont réalisé des gains en apprentissage significativement plus élevés que ceux du groupe témoin (enseignement traditionnel) pour plusieurs aspects de l'enseignement de la génétique, comme les processus génétiques et le calcul des probabilités. Seuls les gains d'apprentissage concernant la terminologie génétique ne sont pas apparus significativement différents entre les deux groupes, bien que les différences entre le pré- et le post-test aient été significatives pour les deux groupes et montrent qu'il y a eu apprentissage dans les deux cas. Ces résultats prouvent que la modélisation mathématique des processus de transmission des traits peut accroître la capacité des élèves à résoudre des problèmes de probabilité génétique de manière quantitative et à utiliser des modèles génétiques quantitatifs pour répondre à des questions qualitatives concernant les processus génétiques de la reproduction.

Mathis *et al.* (2018) se sont demandé comment des élèves du secondaire utilisent les concepts scientifiques et mathématiques qui ont été appris lors de cours préalables de génétique pour trouver des idées et des solutions et prendre des décisions dans le contexte d'une activité d'intégration « science, technologie, ingénierie et mathématiques » (STIM, ou STEM selon l'acronyme anglais) concernant une conception technologique. Les élèves ont suivi un protocole en six leçons visant à poser le problème (un client cherche une façon d'extraire davantage d'ADN d'une plante), à découvrir les concepts scientifiques et

mathématiques nécessaires pour répondre aux attentes du client, à comprendre le processus d'extraction de l'ADN et à réfléchir à des manières d'améliorer la technique afin d'en augmenter le rendement (par exemple, augmenter la surface de contact des extraits de plante pour extraire davantage d'ADN). La recherche a été menée au sein d'une classe étasunienne de 7^e année dans laquelle les élèves ont été regroupés en équipes de quatre ou cinq. Les chercheurs ont filmé et enregistré leurs conversations, en plus de récolter leurs différentes productions ; de plus, une équipe a fait l'objet d'un suivi plus serré dans le cadre d'une étude de cas.

Les chercheurs constatent que les élèves se sont grandement investis dans la recherche d'une solution technologique en utilisant plusieurs des outils conceptuels scientifiques et mathématiques mis à leur disposition pour trouver des idées et prendre des décisions. Ces résultats démontrent qu'un programme d'intégration des STIM soigneusement conçu peut amener les élèves à établir des liens significatifs entre ces disciplines, en particulier dans l'application des sciences et des mathématiques au domaine du génie. Deux facteurs spécifiques semblent expliquer ce résultat. Tout d'abord, le défi d'ingénierie a été minutieusement choisi afin de l'aligner exactement sur les concepts scientifiques et mathématiques visés par l'enseignement. En fait, il fallait nécessairement que les élèves utilisent ces concepts pour réussir ; ils n'y seraient pas arrivés autrement. Le deuxième facteur était l'inclusion explicite, dans les activités, d'étayages nombreux et variés pour aider les élèves à suivre des raisonnements fondés sur des preuves. À chaque étape, ces derniers devaient justifier leurs idées de design et leurs décisions, oralement avec leurs partenaires et par écrit. Cet aspect collaboratif a aussi été une importante source d'apprentissage, en particulier en ce qui a trait à l'évolution des conceptions

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

alternatives des élèves. Leurs nombreuses productions ont également été une source importante d'information pour l'enseignant et ont pu servir à évaluer leur travail.



MISSION

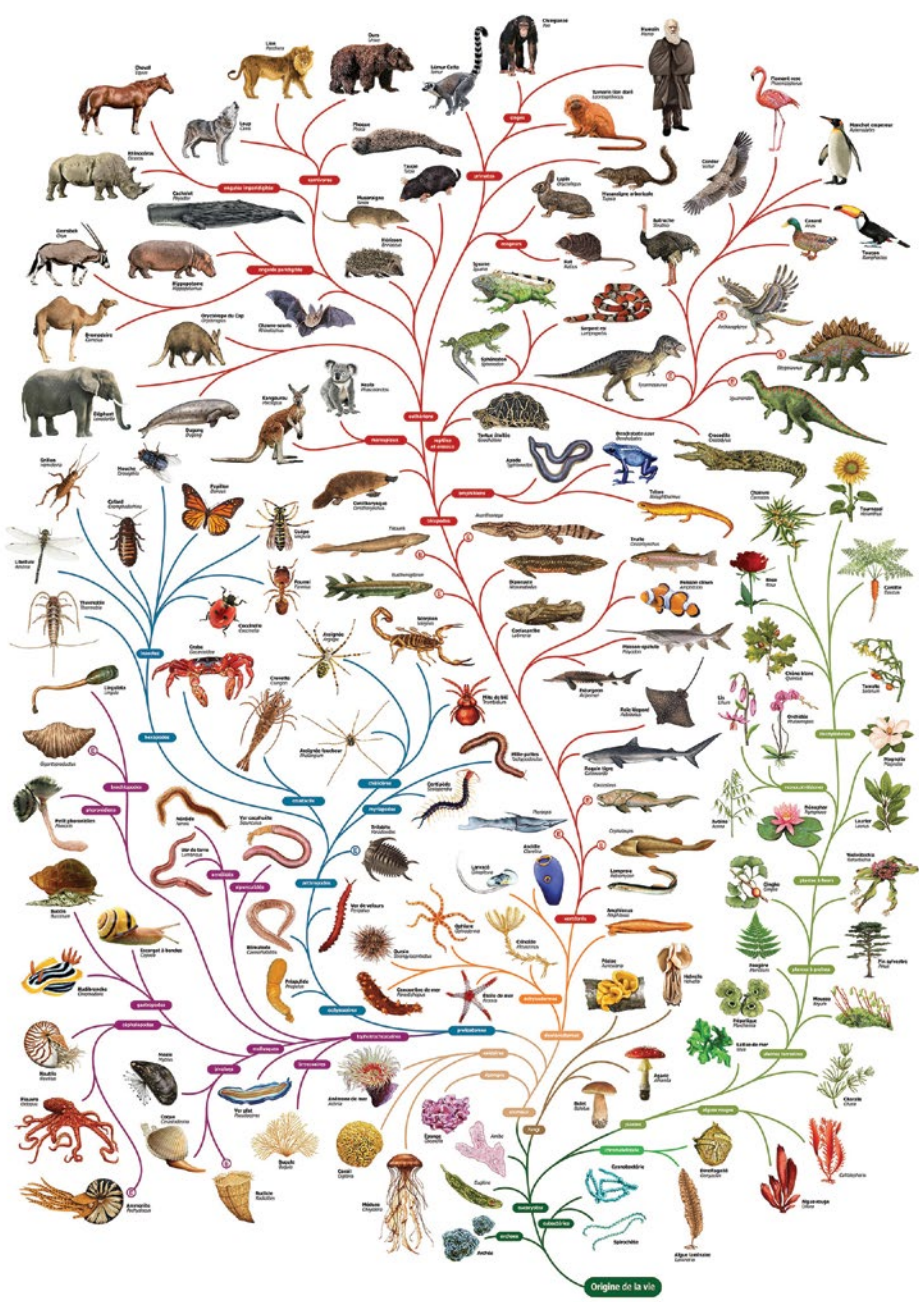
ADM

Sciences citoyennes et apprentissage de la génétique

À travers l'activité Mission ADN-eau, Génome Québec a déjà utilisé l'approche de la science citoyenne afin de mobiliser les élèves autour d'enjeux qui les touchent de près et qui ont des liens étroits avec les sciences de la vie et la génétique. Un tel projet de science citoyenne est une expérience potentiellement transformative, tant pour les élèves participants que pour les enseignants et les chercheurs qui les accompagnent (Bonney *et al.*, 2009; Troutmann, 2013). D'autres organismes ont eux aussi utilisé des projets similaires pour favoriser la participation des élèves à des recherches en génétique et certains ont fait l'objet d'études en sciences de l'éducation.

C'est le cas de Eble et Pecore (2019) qui ont recruté 911 élèves étasuniens du secondaire dans des États situés au nord du golfe du Mexique afin de participer à un projet de science citoyenne intitulé « *Invasive Aliens* ». Il s'agit d'un programme d'identification par analyse génétique (codage à barres de l'ADN, ou *Barcoding* en anglais). Le but de l'activité est d'analyser le contenu de l'estomac d'une espèce invasive, la rascasse volante (poisson-lion, ou *lionfish* en anglais), afin d'évaluer les impacts de sa présence dans le golfe du Mexique sur les espèces indigènes et commerciales dont elle se nourrit. Les chercheurs espéraient qu'en participant à ce projet, les élèves développeraient des compétences techniques, tout en acquérant des connaissances en génétique et en sciences de l'environnement. Ces derniers devaient d'abord disséquer une rascasse puis recueillir des tissus de ses proies, en extraire l'ADN, l'amplifier et le décoder afin d'identifier la ou les espèces que la rascasse mange. Ces données étaient ensuite transmises aux biologistes qui luttent contre cette espèce invasive et aux autorités réglementaires locales (pêche et tourisme).

Les chercheurs ont évalué les apprentissages des élèves (connaissance à propos de l'ADN, connaissance des techniques génétiques, biologie de la rascasse, etc.) ainsi que leur perception de la science (valeur de la science pour la société, leur intérêt pour les sciences, leur anxiété envers les sciences, etc.) avant, puis après leur participation au projet. La comparaison pré-post montre des gains modestes en termes d'apprentissage, mais la plupart des scores de perceptions des élèves ont diminué après l'activité (ce qui est positif dans le cas de l'anxiété, mais pas pour les autres construits évalués). Seul le score de la perception de la valeur de la science pour la société a augmenté après l'activité. Les chercheurs n'ayant pas rapporté d'analyse statistique, il est malheureusement impossible de savoir si ces différences sont significatives ou non. Ils reconnaissent que les activités pratiques auraient eu avantage à être mieux intégrées à l'enseignement prodigué en classe, afin d'améliorer les apprentissages. Ils rapportent toutefois que les élèves semblaient plus motivés, s'identifiaient davantage à des scientifiques et trouvaient importante leur contribution aux travaux de recherche en écologie, mais aucune donnée fournie n'appuie ces affirmations.



Enseignement de la théorie de l'évolution des espèces par sélection naturelle

En publiant son célèbre ouvrage intitulé *De l'origine des espèces* en 1859, le biologiste anglais Charles Darwin a mis en branle une révolution – on en parle comme de la «révolution copernicienne» de la biologie – dont les effets se font encore sentir aujourd'hui. Objet de ridicule et de calomnie au début, l'ouvrage et la théorie qu'il expose sont rapidement devenus des outils indispensables pour comprendre la diversité biologique de notre planète et les mécanismes qui permettent aux espèces de s'adapter à des conditions environnementales toujours changeantes. Quoique la théorie de l'évolution des espèces dans sa forme moderne soit largement acceptée aujourd'hui par la communauté scientifique et une majorité de la population, il demeure des poches de résistance, surtout du côté de certains groupes religieux pour qui le processus de l'évolution est soit carrément faux, soit le fruit du dessein intelligent d'un créateur omnipotent (*Intelligent design*). Pour ces personnes, il est difficile d'admettre le caractère fondamentalement aléatoire et imprévisible du processus de l'évolution, qui repose autant sur des bases génétiques et moléculaires que sur les aléas naturels.

La théorie de l'évolution des espèces est évidemment un thème abordé d'un point de vue scientifique dans la plupart des cours de biologie au secondaire (de secondaire 1 à 3 au Québec, ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2011), bien que dans certains États des États-Unis, les programmes scolaires d'inspiration «*Intelligent design*» exigent une présentation au moins égale de cette vision plus «religieuse» de l'évolution. Un bon enseignement du processus d'évolution des espèces par la sélection naturelle est d'une importance cruciale,

car il s'agit non seulement de la grande théorie unificatrice de la biologie, mais qu'elle est aussi largement considérée comme difficile à comprendre par les élèves (Sandoval, 2003).

Il a également été suggéré que l'accent mis spécifiquement sur la génétique moléculaire pendant l'enseignement pouvait favoriser l'évolution des conceptions alternatives des élèves du secondaire à propos de l'évolution des espèces (Kampourakis et Zogza, 2009), par exemple, en combinant l'enseignement du rôle et du fonctionnement de l'ADN à celui de la sélection naturelle (Kalinowski, Leonard et Andrews, 2010). Selon ces auteurs, les connaissances en génétique moléculaire sont fondamentales pour comprendre cette théorie et faire évoluer les conceptions des élèves dans ce domaine vers les concepts scientifiques. En outre, Ferrari et Chi (1998) affirment que pour favoriser la compréhension du processus de sélection naturelle, il est important que les élèves saisissent les multiples niveaux d'organisation des organismes vivants (moléculaire, cellulaire, organique, etc.) et que l'évolution opère à différentes échelles temporelles et spatiales. Enfin, Alred *et al.* (2019) ont découvert qu'il demeure difficile pour des élèves du secondaire de penser au processus de l'évolution des espèces plus en termes de population qu'en termes d'individu, et de comprendre que les mécanismes de cette évolution s'appliquent d'abord et avant tout aux populations et aux générations successives.

Quelques recherches menées au cours des dernières années en sciences de l'éducation se sont penchées sur l'enseignement de cette importante théorie. C'est le cas de Baumgartner et Duncan (2009) qui se sont demandé jusqu'à quel point des élèves étasuniens de 9^e et de 12^e année comprenaient non seulement les grandes lignes de la théorie de l'évolution des espèces, mais aussi ses bases biologiques et génétiques. Partant du constat que la plupart des élèves du secondaire ont

de nombreuses conceptions alternatives à propos du processus de cette évolution (Anderson, Fisher et Normas, 2002), les chercheurs ont mis en place une séquence d'enseignement d'inspiration constructiviste qui couvrait un large éventail de thèmes liés à la théorie de l'évolution des espèces et à la nature de l'activité scientifique, comme l'idée d'un ancêtre commun, les bases génétiques de l'évolution, les mutations, les variations au sein des populations, l'effet du hasard, la pression de l'environnement et le processus de spéciation. Cet enseignement s'est fait par le biais d'activités en laboratoire et de l'utilisation de modèles et de simulations informatiques. Les auteurs reconnaissent que leur but n'était pas de guider les élèves à travers le raisonnement qui a mené Darwin à sa théorie ; ils ont plutôt tenté de créer une séquence logique de leçons et d'expériences permettant aux élèves de développer une compréhension de plus en plus complexe et approfondie de la sélection naturelle en tant que mécanisme de changement génétique au sein des populations au fil du temps.

Les chercheurs ont évalué leur séquence d'enseignement grâce à un sondage réalisé avant et après l'activité auprès de 52 élèves de 9^e année et de 39 élèves de 12^e année. Le sondage les interrogeait aussi bien sur leur compréhension de la théorie de l'évolution des espèces par sélection naturelle que sur leur attitude vis-à-vis de cette théorie. Les résultats montrent que les élèves les plus jeunes ont davantage vu leur attitude à l'égard de la sélection naturelle et leur connaissance des contenus notionnels s'améliorer. En fait, le niveau de connaissances des plus jeunes a dépassé celui atteint par les plus vieux, malgré le fait qu'ils aient tous suivi le même enseignement. Ces résultats suggèrent que les élèves plus âgés qui n'avaient pas reçu d'enseignement explicite à propos de la sélection naturelle au début de leurs études secondaires ont développé de

nombreuses conceptions alternatives en cours de route et qu'ils ont alors eu plus de temps pour les consolider, consolidation les rendant plus résistantes à l'enseignement, un écueil déjà évoqué par Kampourakis et Zogza (2009). En ce qui concerne l'attitude des élèves envers la sélection naturelle, les chercheurs constatent qu'après l'enseignement, les plus jeunes ont à nouveau systématiquement dépassé les élèves plus âgés en termes de réponses positives. Ces deux résultats prouvent, selon les auteurs, qu'un enseignement de ces concepts doit avoir lieu plus tôt dans le programme scolaire, avant que plusieurs conceptions alternatives élaborées dans des contextes extrascolaires ne se cristallisent davantage. Les auteurs remarquent aussi qu'il est demeuré un certain nombre de conceptions initiales concernant une vision lamarckienne de l'évolution (les individus se transforment pour s'adapter aux changements de l'environnement) après l'enseignement.

Tenenbaum *et al.* (2015) se sont demandé si les raisonnements d'élèves anglais âgés de 13 à 16 ans à propos de la théorie de l'évolution de Darwin avaient changé avant et après leur participation à un atelier-débat tenu dans un musée d'histoire naturelle (le Museum d'histoire naturelle de Londres). Les résultats obtenus avec ce groupe d'élèves ont été comparés à ceux d'un groupe n'ayant pas participé à l'atelier-débat. Durant la visite du musée, les élèves du groupe traitement, répartis en équipes, ont été invités à recréer le *Great Oxford Debate*, tenu le 30 juin 1860 à Oxford et ayant réuni une brochette de scientifiques et de philosophes anglais autour du livre de Darwin, paru quelques mois plus tôt. Les élèves ont reçu le nom d'un des personnages ayant participé à ce débat dans le but d'adopter les positions (pour ou contre l'évolution, pour ou contre la nature « animale » de l'homme, etc.) de ce dernier et ont visité certaines sections du musée en compagnie d'un animateur afin

de recueillir des indices et des preuves appuyant cette position. Lors du débat, un facilitateur du musée a animé les discussions au cours desquelles chaque équipe d'élèves devait présenter ses indices et défendre sa position. Enfin, un éducateur scientifique a présidé une séance plénière afin de montrer aux élèves l'importance du choix des preuves qui peuvent influencer une théorie et de leur expliquer la raison pour laquelle la science doit être revue par des pairs. L'objectif de cette séance était d'amener les élèves à comprendre que différentes personnes peuvent tirer des conclusions différentes sur la base de preuves similaires, en fonction de leurs croyances et de leurs positions épistémologiques.

Cinquante-deux élèves du groupe traitement et 18 du groupe témoin ont participé à des entretiens semi-dirigés d'une vingtaine de minutes avant et après la visite au musée (les entrevues ont été menées le même jour avec les élèves du groupe témoin). Au cours de ces entrevues, on leur a posé des questions en lien avec la théorie de l'évolution pour cinq espèces différentes : tigre de Tasmanie, phoque, pinson, algue et humain. Les réponses ont été codées en fonction de quatre catégories, qui pouvaient aussi être combinées : raisonnement naturaliste éclairé, raisonnement naturaliste naïf, raisonnement créationniste et ne sais pas. Après analyse, il s'avère que les élèves qui ont participé au débat étaient plus susceptibles de tenir un raisonnement éclairé lors du deuxième entretien que lors du premier. En revanche, il n'y avait aucune différence dans la tenue d'un raisonnement éclairé entre les deux entretiens pour les élèves du groupe témoin. De même, le nombre de raisonnements naïfs a diminué pour le groupe traitement, mais pas pour le groupe témoin. Aucune variation significative n'est apparue concernant l'utilisation de raisonnement créationniste d'un groupe à l'autre.

Les auteurs en concluent que les élèves qui ont participé au débat étaient plus susceptibles de tenir un raisonnement évolutionnaire et moins susceptibles de tenir un raisonnement intuitif au cours du second entretien, ce qui n'était pas le cas de ceux qui n'y ont pas participé. D'autre part, la majorité des élèves ayant participé au débat se sont appuyés sur différents modes de connaissance et de raisonnement lorsqu'on leur a demandé d'expliquer comment diverses espèces ont évolué. Enfin, les élèves ont continué à utiliser plusieurs types de raisonnement avant et après leur visite au musée et leur participation au débat.

Les auteurs notent également la faible présence de raisonnements créationnistes chez l'ensemble des élèves interviewés, un constat contrastant avec ceux faits à la suite d'études similaires menées aux États-Unis (Evans *et al.*, 2009). D'autre part, les résultats semblent indiquer que malgré une meilleure compréhension de l'évolution darwinienne de la part des élèves ayant participé au débat, ceux-ci continuent à éprouver des difficultés à comprendre l'évolution de manière cohérente et continuent à se baser en partie sur des notions intuitives. L'amélioration de la compréhension à la suite de la visite du musée paraît donc progressive et additive et ne pas dissiper toutes les conceptions intuitives antérieures.

Premo *et al.* (2019) ont remarqué que l'idée selon laquelle des traits acquis par un animal au cours de sa vie peuvent être transmis à ses descendants et participer ainsi au processus évolutif (une idée inspirée du lamarckisme) demeure une conception alternative tenace chez bien des élèves. Les chercheurs se sont demandé jusqu'à quel point des élèves du secondaire feront appel à cette conception ou non, selon que leur sera présenté un scénario où des changements de comportement auront ou non des impacts sur des aspects

physiques (traits) des individus. Ils ont également voulu comparer deux approches éducatives en ce qui concerne l'enseignement de la transmission héréditaire dans le contexte de l'évolution des espèces : la construction de catégories (*category construction*, avec plus ou moins de rétroaction de la part des enseignants) et l'utilisation d'une fiche créée par l'élève. Les chercheurs avaient l'espoir que la première favoriserait une réflexion plus scientifique et moins intuitive (c.-à-d. basée sur les conceptions alternatives) de la part des élèves. Dans une activité de construction de catégories, on demande aux apprenants de trier un ensemble de scénarios, incluant des contre-exemples, et de les regrouper de manière cohérente afin qu'ils illustrent un principe scientifique ciblé.

L'étude a été menée auprès de 225 élèves étasuniens de 7^e année. Ceux du groupe traitement (construction de catégories) devaient identifier trois scénarios de transmission de traits génétiques d'un parent à ses descendants parmi six scénarios soumis (les trois scénarios alternatifs décrivaient la transmission d'un comportement, et non d'un trait génétique). Dans ce groupe traitement, trois sous-groupes ont aussi été mis en place : sans rétroaction de la part de l'enseignant ; avec rétroaction individuelle ; et avec rétroaction à toute la classe. Un groupe témoin a travaillé sur les trois mêmes scénarios scientifiques de transmission génétique des traits (ils n'ont donc pas été mis en contact avec les contre-exemples). On a aussi demandé aux élèves d'expliquer leur raisonnement. Trois jours plus tard, tous les élèves ont répondu à un questionnaire à questions ouvertes leur présentant deux scénarios évolutifs similaires à ceux utilisés pendant l'activité, les deux concernaient la transmission d'un comportement, mais un seul avait un impact sur l'aspect physique des individus (des ours ayant appris à aiguiser leurs griffes sur des rochers).

L'analyse des résultats montre que, face aux scénarios décrits ci-dessus, les élèves (tous groupes confondus) ont utilisé le même nombre d'arguments scientifiques dans leurs justifications dans les deux cas, mais qu'ils ont utilisé significativement plus d'arguments intuitifs dans le second scénario, où un changement physique était impliqué. Cela correspond à l'hypothèse des chercheurs selon laquelle des indices liés à des changements physiques chez un animal entraîneraient, de la part des élèves, un raisonnement plus intuitif à propos de l'évolution des espèces. En outre, le fait que les élèves aient tenu le même nombre de raisonnements scientifiques, mais pas le même nombre de raisonnements intuitifs, pour les deux scénarios suggère que ces deux modes de raisonnement sont indépendants. En d'autres termes, il ne semble pas y avoir de relation entre l'application d'un raisonnement scientifique et d'un raisonnement intuitif par les élèves lorsqu'il est question d'évolution. Les résultats obtenus indiquent également que l'idée selon laquelle les concepts scientifiques remplacent les conceptions alternatives ne semble pas validée empiriquement et qu'il faut plutôt songer à une forme de coexistence ; dans ce contexte, le but de l'enseignement serait plutôt d'amener les élèves à se méfier de leurs intuitions, à les inhiber (voir Potvin et Cyr, 2017).

D'autre part, les élèves du groupe traitement (construction de catégories) ont utilisé significativement plus d'arguments scientifiques dans leurs raisonnements que ceux du groupe témoin. À l'intérieur du groupe traitement, ce sont les élèves qui ont bénéficié d'une rétroaction individuelle qui ont avancé le plus d'arguments scientifiques, suivis des élèves ayant bénéficié d'une rétroaction de classe, puis de ceux sans rétroaction. Les chercheurs constatent en outre que les élèves peuvent tenir simultanément un raisonnement scientifique et un raisonnement

intuitif à propos des principes de l'évolution, mais que la tâche de construction de catégories semble favoriser l'utilisation de raisonnements scientifiques par les élèves. De plus, le fait de fournir aux élèves une rétroaction individuelle semble être l'approche d'enseignement optimale associée à l'activité de construction de catégories. Dans la présente étude, la rétroaction individuelle a permis d'augmenter le raisonnement scientifique et de diminuer le raisonnement intuitif dans une plus grande proportion que la construction de catégorie sans rétroaction.



HOMO
NEANDERTHALIS



HOMO
ANTECESSOR



HOMO
SAPIENS



HOMO
ERECTUS

Enseignement de la génétique, essentialisme génétique et discrimination basée sur les gènes

Depuis les débuts de la génétique, cette science a été instrumentalisée par certains individus afin de légitimer diverses politiques favorisant la domination d'un groupe humain sur un autre (Jackson et Depew, 2017). On parle alors d'essentialisme génétique, qui est la croyance que les groupes raciaux possèdent des essences génétiques différentes à l'origine de leurs diversités physiques, cognitives, mais aussi comportementales ou sociologiques. Aujourd'hui encore, cette croyance est utilisée pour justifier les préjugés, la ségrégation et les politiques discriminatoires envers certains groupes (Dar-Nimrod et Heine, 2011 ; Soylyu, Estrada-Villalta et Adams, 2017).

Des recherches menées par Donovan (2015) suggèrent que les programmes scolaires étasuniens de biologie au secondaire jouent un rôle important dans la perpétuation de ces conceptions. En effet, il semble que la part de la pensée déterministe et celle de la pensée essentialiste s'accroissent chez les élèves lorsqu'ils sont exposés à des arguments génétiques concernant les différences entre les individus et les races (Dar-Nimrod et Heine, 2011). Rappelons que la constatation, confirmée par la recherche en génétique, qu'il y a en moyenne davantage de variations génétiques au sein d'un même groupe racial qu'entre les groupes raciaux contredit la croyance essentialiste.

On est bien sûr loin des manuels de biologie du début du XX^e siècle, qui professaient la supériorité biologique de la race blanche (Donovan, 2015). De telles affirmations sont heureusement absentes des manuels scolaires contemporains, mais des résultats de recherches empiriques montrent une forte corrélation entre la façon de représenter les races humaines dans les programmes de biologie et le développement de préjugés

raciaux chez les élèves (Donovan, 2014; 2016; 2017). Ces représentations peuvent les amener à croire que plusieurs des différences observées entre les groupes humains sont dues à des différences génétiques, comme celles en matière d'intelligence, d'assiduité au travail, de propension à commettre des crimes, etc. C'est pourquoi il est important de s'assurer que dans les programmes scolaires, l'enseignement de notions de génétique qui touchent au concept de race appliqué aux êtres humains soit traité avec doigté et que les chercheurs et les enseignants gardent en tête les dérives possibles qui pourraient naître d'une mauvaise compréhension de ces notions par les élèves.

Donovan (2014) a ainsi cherché à étudier l'impact de la présentation racisée de certaines maladies génétiques dans les manuels scolaires du secondaire sur les conceptions essentialistes des élèves. Selon l'auteur, les passages de manuels qui font des associations directes entre certaines races et certaines maladies génétiques risquent fort de renforcer les pensées essentialistes des élèves qui les consultent.

L'étude a été réalisée dans une classe de 8^e année d'une école secondaire privée étasunienne. Les 43 élèves recrutés ont été répartis en deux groupes, chacun lisant un passage original et un autre légèrement modifié tiré de leur manuel scolaire de biologie. Bien que les deux textes portaient sur les maladies génétiques humaines, l'un (extrait original) faisait des liens explicites entre la prévalence de certaines maladies génétiques et des groupes racisés, comme les Afro-Américains (drépanocytose) ou les Caucasiens (fibrose kystique), tandis que l'autre (le même extrait, mais modifié) couvrait les mêmes thèmes, mais sans faire référence au concept de race humaine.

Le chercheur a évalué la compréhension des textes par les élèves. Après une courte activité servant de distracteur, pour éviter que les élèves fassent un lien explicite entre leur lecture

et les prises de mesure subséquentes, on leur a demandé de remplir des questionnaires pour évaluer leurs conceptions concernant la race. Indépendamment de l'origine ethnique des élèves, de leur genre, de leur âge, de leurs conceptions raciales antérieures et de leur niveau de compréhension du texte qu'ils ont lu, le chercheur constate que les élèves qui ont lu le texte « racisé » ont exprimé davantage de conceptions essentialistes de la race après coup que les élèves qui ont lu l'autre texte. En outre, les différences étaient statistiquement significatives avec des tailles d'effet moyennes.

L'analyse des données a aussi indiqué qu'une meilleure compréhension des mécanismes de la génétique mendélienne par les élèves diminuait l'influence du texte « racisé » sur eux. Les réponses des élèves aux mêmes questionnaires, soumis une semaine plus tard, montrent que cet effet est durable. Ces résultats suggèrent que l'enseignement de la biologie au secondaire, s'appuyant sur des manuels qui font référence au concept de race appliqué aux humains, peut renforcer par inadvertance chez les élèves des conceptions essentialistes de la race, conceptions sous-tendant souvent les préjugés raciaux.

Donovan a refait la même étude deux ans plus tard (Donovan, 2016) en y ajoutant deux autres questions de recherche, à savoir : la lecture de textes associant les maladies génétiques à la race pousse-t-elle les élèves à croire que l'écart de réussite socioéconomique entre les races peut lui aussi être d'origine génétique, et à quel point cette croyance influencerait-elle leur intention de contribuer ou non à la diminution de l'écart de réussite entre les groupes racisés ? Cette recherche a été menée auprès de 86 élèves étasuniens d'une classe de 9^e année d'une école publique (âgés de 14 et 15 ans). Les mêmes textes et les mêmes instruments que Donovan (2014) ont été utilisés.

Les résultats montrent que les élèves ayant lu le texte « racisé » se sont dits nettement plus d'accord avec l'affirmation voulant que les différences raciales soient basées sur les gènes que ceux de l'autre groupe. L'analyse des réponses des élèves concernant l'écart de réussite socioéconomique entre les races a également montré que le premier groupe croit davantage que cet écart est lié à la génétique que le second. En outre, les élèves qui ont lu le texte « racisé » ont moins tendance à vouloir s'investir personnellement pour diminuer l'écart de réussite entre les races. En résumé, ces résultats confirment encore une fois que le fait d'inciter les élèves à considérer la prévalence d'une maladie génétique en termes de race peut les amener à penser que les groupes raciaux diffèrent pour des raisons génétiques sur d'autres plans que le plan physique, notamment sur le plan comportemental et socioéconomique.

Donovan (2017) a mené une troisième étude similaire, cette fois avec 135 élèves de la 7^e à la 9^e année, se demandant si la terminologie racisée utilisée dans certains manuels scolaires de biologie pouvait être à l'origine de l'introduction de biais racistes dans la pensée des adolescents. Les élèves participants ont été répartis en deux groupes : un premier a lu quatre textes en lien avec les différences raciales dans la structure du squelette des individus et la prévalence de certaines maladies génétiques, tandis que l'autre groupe a également lu quatre textes sur les mêmes sujets, mais sans référence au concept de race humaine. Le chercheur a mesuré l'accord des élèves avec la proposition voulant qu'il existe une plus grande variation biologique entre les races qu'en leur sein, leur accord avec l'idée qu'une cause génétique était à l'origine des différences raciales, leur intérêt pour les contacts sociaux interraciaux et leur soutien aux politiques éducatives visant à réduire l'inégalité raciale. Ces construits ont été évalués à

répétition, à environ deux semaines d'intervalle chaque fois, durant les trois mois qu'a duré l'étude.

Les résultats montrent que la croyance en une plus grande différence génétique entre les races qu'en leur sein par les élèves ayant lu les textes « racisés » a augmenté de manière significative par rapport à celle des élèves de l'autre groupe. En outre, les élèves ayant lu les textes « racisés » ont aussi acquis la conviction que les races humaines diffèrent en termes d'intelligence sur la base de leur bagage génétique ; là encore, la différence avec les élèves de l'autre groupe était significative. Enfin, ces mêmes élèves exposés aux textes « racisés » sont devenus nettement moins enclins à établir des contacts sociaux interraciaux, et aussi moins favorables envers les politiques éducatives qui visent à réduire les inégalités raciales. Ces résultats prouvent bien comment l'enseignement de la biologie peut amener des élèves à soutenir les inégalités raciales, mais aussi comment un enseignement de la génétique humaine évitant ce genre de biais pourrait potentiellement contribuer à réduire le racisme fondé sur la génétique.

Pour tester cette idée, Donovan *et al.* (2019a) ont poursuivi l'étude des déterminants de l'essentialisme génétique en se demandant si le fait de fournir à des élèves des données probantes fiables à propos des variations génétiques à l'intérieur et entre les groupes raciaux étasuniens, données issues du *U.S. Census Bureau* (Bureau du recensement des États-Unis), et par conséquent leur prodiguer un enseignement non-essentialiste de la génétique, pouvait contribuer à réduire leurs préjugés raciaux.

L'étude a été menée aux États-Unis en deux temps : d'abord avec 166 élèves de 8^e et 9^e année qui ont travaillé avec des données sur papier, puis avec 721 élèves de la 9^e à la 12^e année à qui les données ont été présentées sur une plateforme

informatique. Cent soixante-seize adultes ont aussi utilisé la plateforme et suivi un enseignement semblable à celui des élèves. Le but de l'intervention était d'aider les apprenants à différencier les informations génétiques qui appuient l'essentialisme génétique de celles qui le contredisent, afin de les amener à juger de ces informations comme un expert le ferait.

Parce que les croyances sur la race sont en partie idéologiques (Lewontin, 1996) et pour connaître la part de ce possible biais idéologique dans leur étude, les chercheurs ont créé un groupe témoin qui a suivi la même séquence d'enseignement basée sur des données probantes, mais à propos des changements climatiques, un autre enjeu controversé aux États-Unis. Les chercheurs ont, là aussi, utilisé des données contrefactuelles afin d'apprendre aux élèves à analyser et à distinguer les données fiables des données qui contredisent la réalité anthropique des changements climatiques.

Les résultats montrent qu'un enseignement non-essentialiste à propos des variations génétiques humaines a permis de réduire de manière statistiquement significative les préjugés raciaux des élèves et l'idée que les races sont génétiquement différentes. Grâce à cette expérience, les chercheurs ont démontré que lorsque les élèves reçoivent des informations scientifiquement exactes au sujet des variations génétiques humaines entre les races et à l'intérieur des races, cela réduit leurs préjugés raciaux et leur perception que les races humaines sont génétiquement différentes. Ces résultats sont demeurés stables pendant au moins trois semaines à l'intérieur d'un échantillon majoritairement composé d'élèves caucasiens issus de milieux aisés. De tels résultats laissent croire qu'un enseignement visant à combattre l'essentialisme génétique et l'idée même de l'existence de races humaines différentes peut servir à diminuer les préjugés au sein de la société.

Donovan *et al.* (2019b) se sont penchés sur la question de la perception des différences génétiques entre les genres et de leurs effets sur la réussite des hommes et des femmes en science. En effet, la croyance selon laquelle les hommes et les femmes se distinguent dans leurs capacités à comprendre les concepts scientifiques et à mener des carrières en science en raison de différences génétiques entre les sexes contribue de manière importante aux disparités entre les genres que l'on constate dans plusieurs domaines des STIM.

Au cours de leur expérience, les auteurs ont étudié comment le contenu du programme d'enseignement de la génétique au secondaire influençait les croyances des élèves à propos des capacités scientifiques des hommes et des femmes ; les chercheurs voulaient ainsi évaluer la présence chez les élèves d'un biais sociocognitif connu sous le nom d'essentialisme neurogénétique (c.-à-d. la croyance que des différences inhérentes dans les gènes et le cerveau des hommes et des femmes sont une cause importante des différences de comportement, d'intelligence et d'aptitudes entre les genres). Quatre cent soixante élèves étasuniens de la 8^e à la 10^e année ont été répartis au hasard dans trois groupes pour lire un texte de génétique qui, pour le premier, expliquait les différences entre les sexes chez les plantes ; pour le deuxième, expliquait les différences entre les sexes chez les humains ; et pour le troisième, réfutait l'essentialisme neurogénétique comme un construit socioculturel. Les élèves ont d'abord répondu à un prétest, puis à un post-test après la lecture.

Après leur lecture, les élèves des deux premiers groupes, qui ont lu un texte insistant sur les différences entre les sexes chez les humains et chez les plantes, exprimaient une croyance significativement plus grande envers l'essentialisme neurogénétique et le caractère inné des capacités

scientifiques des hommes et des femmes que les élèves ayant lu le texte réfutant un tel essentialisme. L'analyse des données a démontré que l'effet des lectures liant sexe et différences génétiques sur la croyance que les aptitudes scientifiques sont innées était médiatisé par l'essentialisme neurogénétique et que cet effet était significatif chez les filles, mais pas chez les garçons. Les chercheurs ont aussi découvert que la croyance que les aptitudes scientifiques sont innées entraînait une baisse d'intérêt pour les STIM chez les filles, mais pas chez les garçons.

Ces résultats suggèrent que l'apprentissage des différences génétiques humaines n'est pas socialement neutre et que la façon dont on enseigne les différences génétiques entre les sexes dans les programmes scolaires pourrait être l'un des facteurs qui influent sur la perpétuation de cette croyance. Par ailleurs, les résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les disparités entre les sexes dans les STIM pourraient être influencées indirectement et en partie par la présentation du contenu en génétique du programme scolaire, même si celui-ci n'aborde pas directement la question des capacités cognitives des hommes et des femmes. Ainsi, lorsque le contenu du programme scolaire qui aborde la génétique humaine remet en question l'essentialisme neurogénétique, il pourrait réduire la croyance en une théorie du genre en matière d'aptitude scientifique et par conséquent contribuer à réduire les inégalités entre les sexes dans les formations et les carrières en STIM. Au contraire, lorsque le contenu d'un tel programme contribue à activer l'essentialisme neurogénétique, il pourrait renforcer cette croyance et accentuer les inégalités entre les sexes en ce qui a trait aux apprentissages et aux carrières en STIM.

Alors que les résultats de Donovan *et al.* (2019b) suggèrent qu'il existe une relation entre le type de lecture auquel les élèves ont été confrontés et divers indicateurs de la pensée essentialiste, Stuhlsatz, Buck Bracey et Donovan (2020) ont réanalysé les données recueillies auprès des mêmes 460 élèves étasuniens pour savoir si l'amalgame entre le terme « genre » (un construit social) et le terme « sexe » (une réalité biologique) dans le langage des élèves pouvait être à l'origine de ces résultats.

Grâce à cette seconde analyse, basée sur les données recueillies par Donovan *et al.* (2019b), les chercheurs ont montré que les élèves des trois conditions expérimentales ont utilisé des termes liés au sexe et au genre dans leurs réponses au pré- et post-test. Cependant, les élèves qui ont lu le texte de réfutation (c.-à-d. l'essentialisme neurogénétique est un construit socioculturel) ont eu tendance à utiliser les concepts de genre et de sexe de manière plus délibérée et cohérente afin d'expliquer les différences homme-femme dans la réussite académique (obtention d'un doctorat), tandis que les élèves qui ont lu les textes sur les différences sexuelles chez les plantes et chez les humains ont employé les deux termes de manière interchangeable, ce qui suggère une certaine confusion ou un amalgame subconscient entre les notions de genre et de sexe. De plus, cette confusion est plus importante chez les élèves qui ont lu le texte sur les différences sexuelles chez les humains que chez ceux qui ont lu celui à propos des différences sexuelles chez les plantes.

En conclusion, les auteurs insistent sur l'importance de bien distinguer genre et sexe dans toute discussion qui relève de l'enseignement de la génétique et des différences homme-femme. Enfin, ils enjoignent aux concepteurs de matériel pédagogique de trouver de nouvelles façons d'intégrer les questions sociales liées au genre et aux autres construits sociaux, comme la race, dans leurs matériels et à mener des tests sur le terrain

pour s'assurer que ces derniers sont bien compris par les élèves et permettent d'atteindre les objectifs d'apprentissage prévus, tout en évitant de renforcer des préjugés. Cet effort doit également être inclus dans la formation professionnelle initiale et continue des enseignants, afin qu'ils soient en mesure de bien guider leurs élèves dans l'apprentissage de ces concepts fortement chargés socialement.

Finalement, Donovan, Weindling et Lee (2020) ont étudié l'évolution de l'essentialisme génétique chez 254 élèves étasuniens de la 7^e à la 12^e année selon qu'ils ont étudié les concepts liés à la génétique mendélienne et à la génétique moléculaire en suivant un programme scolaire traditionnel ou un enseignement insistant sur l'aspect multifactoriel de l'hérédité et de l'ascendance génétique. Les auteurs notent que la plupart des traits humains complexes ne s'expliquent pas par la variation d'un seul gène. Même les pois que Mendel a étudiés dans ses expériences classiques ne suivent pas ce modèle trop simplificateur. En fait, la plupart des traits décrits comme « monogéniques » dans les manuels de biologie sont en réalité polygéniques. Ainsi, les variations humaines, en particulier celles concernant les traits complexes, sont mieux expliquées par des modèles multifactoriels d'héritage (c.-à-d. la variation d'un trait est influencée par une combinaison d'effets environnementaux, d'effets polygéniques et d'interactions gène-environnement). Cela signifie que les traits humains complexes, comme le QI, sont malléables, car ils seront influencés par les environnements culturels et écologiques dans lesquels évolue un individu. Le programme scolaire traditionnel ne mentionnait pas ces aspects liés à la race, à la génétique multifactorielle ou à l'ascendance génétique.

Les différentes prises de mesure ont été faites à deux semaines d'intervalle pendant dix semaines. Chaque fois, les

chercheurs ont utilisé quatre instruments pour mesurer divers éléments : les connaissances des élèves à propos de la génomique ; leur perception des variations génétiques entre les races ; dans quelle proportion ils attribuaient les différences raciales à des variations génétiques ; et leur croyance explicite en l'essentialisme génétique. Par rapport aux élèves qui ont suivi un enseignement plus traditionnel, les classes à qui l'on a inculqué les concepts en génétique à partir des points de vue de la génétique multifactorielle ont démontré une compréhension significativement plus élevée de ces concepts. Par ailleurs, ces élèves percevaient significativement moins de variations génétiques entre les races, ils attribuaient une part significativement moindre aux variations génétiques dans les différences raciales et leurs croyances essentialistes en matière de génétique avaient significativement diminué. Ces résultats suggèrent en outre que les programmes scolaires mettant l'accent sur la complexité génétique et le caractère multifactoriel de l'ascendance génétique sont plus susceptibles d'amener les élèves à développer une vision anti-essentialiste cohérente des différences entre les groupes humains.

En conclusion, les auteurs notent que le type de « culture génétique » que l'enseignement de la génétique amène les élèves à développer est important en raison de son impact sur leur croyance en l'essentialisme génétique. Les résultats montrent que l'enseignement de la génétique est une bonne façon d'aider les élèves à bien saisir que les inégalités raciales ne peuvent être réduites aux seuls gènes des individus et à comprendre pourquoi il est scientifiquement problématique et socialement préjudiciable d'utiliser les gènes pour rationaliser toute forme d'oppression ou de division raciale.

Difficultés avec le vocabulaire et les termes en génétique

Les idées en génétique ne sont pas que conceptuellement complexes, elles sont aussi linguistiquement difficiles pour les élèves du secondaire (Tsui et Treagust, 2010). Le vocabulaire technique utilisé en génétique est riche, débordant d'expressions multisyllabiques, comme chromosome, hétérozygote, homozygote, ou polymérase, ou de termes dont l'utilisation est restreinte à la description d'entités et de phénomènes génétiques qui ne correspondent à rien dans notre quotidien, comme allèle, méiose, mitose, etc. (Johnstone et Selepeng, 2001 ; Knippels, 2002). La signification de ces mots ne peut donc pas être déduite ou rapportée à une quelconque expérience de la vie quotidienne (Wellington, 2000). Pourtant, la maîtrise du langage scientifique en tant que porte d'entrée de la culture scientifique et en tant que clé de la compréhension de ses principaux concepts a été reconnue comme essentielle depuis les travaux de Vygotski (1978) et le développement du socioconstructivisme en éducation.

Étonnamment, aucune recherche parmi celles que nous avons recensées n'aborde spécifiquement cette question de savoir comment les élèves s'approprient, comprennent et utilisent le vocabulaire complexe de la génétique dans leurs apprentissages. Très peu d'études en font même mention. Duncan *et al.* (2017) font exception, puisqu'ils affirment avoir pris un soin particulier à aider les élèves à maîtriser le vocabulaire adéquat pour qu'ils puissent débattre et développer leur compréhension des modèles en génétique. Furberg et Arnseth (2009) constatent eux aussi que, faute de maîtriser le langage de la génétique, les discussions entre élèves au cours d'un débat socioscientifique en classe s'enlisent et bloquent. Des interventions visant à assurer une meilleure maîtrise du vocabulaire de la génétique par les élèves devraient donc être plus fréquentes.



Bibliographie

- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057–1095.
- Alred, A. R., Doherty, J. H., Hartley, L. M., Harris, C. B., & Dauer, J. M. (2019). Exploring student ideas about biological variation. *International Journal of Science Education*, 41(12), 1682–1700. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1635289>.
- Anderson, D. L., Fisher, K. M., & Normas, G. J. (2002). Development and evaluation of the conceptual inventory of natural selection. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(10), 952–978.
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59, 977–984.
- Catley, K., Lehrer, R., & Reiser, B. (2005). *Tracing a Prospective Learning Progression for Developing Understanding of Evolution*. Paper Commissioned by the National Academies Committee on test design for K–12 science achievement, 67.
- Chapman, R., Likhanov, M., Selita, F., Zakharov, I., Smith-Woolley, E., & Kovas, Y. (2019). New literacy challenge for the twenty-first century: Genetic knowledge is poor even among well educated. *Journal of Community Genetics*, 10(1), 73–84.

- Chi, M. T. H., Slotta, J. D., & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4(1), 27–43.
- Cyranoski, D. (2020). What CRISPR-baby prison sentences mean for research. *Nature*, 577, 154–155. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00001-y>
- Dar-Nimrod, I., & Heine, S. J. (2011). Genetic essentialism: On the deceptive determinism of DNA. *Psychological Bulletin*, 137(5), 800–818.
- Dass, P. M. (2005). Understanding the nature of scientific enterprise (NOSE) through a discourse with its history: The influence of an undergraduate « history of science » course. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 3(1), 87–115.
- Dawson, V. M., & Schibeci, R. A. (2003). West Australian school students' understanding of biotechnology. *International Journal of Science Education*, 25(1), 57–69.
- Diakidoy, I. N., Kendeou, P., & Ioannides, C. (2003). Reading about energy: The effects of text structure in science learning and conceptual change. *Contemporary Educational Psychology*, 28, 335–356.
- Donovan, B. M. (2015). Reclaiming race as a topic of the U.S. biology textbook curriculum. *Science Education*, 99(6), 1092–1117.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5(1), 61–84.

BIBLIOGRAPHIE

- Driver, R. (1981). Pupils' alternative frameworks in science. *European Journal of Science Education*, 3(1), 93–101.
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Duncan, R. G., Castro-Faix, M., & Choi, J. (2014). Informing a learning progression in genetics: Which should be taught first, Mendelian inheritance or the central dogma of molecular biology? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 14(3), 445–472.
- Duncan, R. G., & Reiser, B. J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: Students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(7), 938–959.
- Duncan, R. G., Rogat, A., & Yarden, A. (2009). A learning progression for deepening students' understanding of modern genetics across the 5th–12th grades. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 655–674.
- Elmesky, R. (2013). Building capacity in understanding foundational biology concepts: A K–12 learning progression in genetics informed by research on children's thinking and learning. *Research in Science Education*, 43(3), 1155–1175.

- Evans, E. M., Spiegel, A., Gram, W., & Diamond, J. (2009). Integrating developmental and free-choice learning frameworks to investigate conceptual change in visitor understanding. *Educational Psychology Papers and Publications*, 186. <http://digitalcommons.unl.edu/edpsychpapers/186>
- Ferrari, M., & Chi, M. T. H. (1998). The nature of naive explanations of natural selection. *International Journal of Science Education*, 20(10), 1231–1256.
- Gericke, N. M., & Hagberg, M. (2007). Definition of historical models of gene function and their relation to students' understanding of genetics. *Science & Education*, 16(7–8), 849–881.
- Godin, B., Gingras, Y., & Bourneuf, É. (1998). *Les indicateurs de culture scientifique et technique*. Sainte-Foy : Conseil de la science et de la technologie, MICST et MCC.
- Guzzetti, B. J. (2000). Learning counter-intuitive science concepts: What have we learned from over a decade of research? *Reading & Writing Quarterly*, 16, 89–98.
- Jackson, J. P., & Depew, D. J. (2017). *Darwinism, Democracy, and Race: American Anthropology and Evolutionary Biology in the Twentieth Century*. New York, NY : Routledge.
- Joslyn, M. R., & Haider-Markel, D. P. (2008). Genetic attributions, immutability, and stereotypical judgments: An analysis of homosexuality. *Social Science Quarterly*, 97(2), 376–390.

BIBLIOGRAPHIE

- Halloun, I., & Hestenes, D. (1985). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53(11), 1043–1055.
- Helm, H. (1980). Misconceptions in physics amongst South African students. *Physics Education*, 15(2), 92–105.
- Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88, 28–54.
- Institut de la statistique du Québec (2016). *Niveau de scolarité et domaine d'études en 2016 selon le sexe, le groupe d'âge et la région administrative*. Repéré à https://statistique.quebec.ca/fr/document/niveau-de-scolarite-et-domaine-detudes-en-2016-selon-le-sexe-le-groupe-dage-et-la-region-administrativescolarite/scol_pop_15_sex_a_qc.htm.
- Irwin, A. R. (2000). Historical case studies: Teaching the nature of science in context. *Science Education*, 84, 5–26.
- Jenkins, E. W. (1994). HPS and school science education: Remediation or reconstruction? *International Journal of Science Education*, 16(6), 613–623.
- Jittivadhna, K., Ruenwongsa, P., & Panijpan, B. (2009). Making ordered DNA and protein structures from computer-printed transparency film cut-outs. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 37(4), 220–226. <https://doi.org/10.1002/bmb.20299>

- Johnstone, A. H., & Selepeng, D. (2001). A language problem revisited. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(1), 19–29.
- Justi, R. S. (2009). Learning how to model in science classroom: Key teacher's role in supporting the development of students' modelling skills. *Educación química*, 20(1), 32–40.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002b). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369–387. <https://doi.org/10.1080/09500690110110142>
- Kalinowski, S. T., Leonard, M. J., & Andrews, T. M. (2010). Nothing in evolution makes sense except in the light of DNA. *CBE–Life Sciences Education*, 9, 87–97.
- Kapur, M. (2012). Productive failure in learning the concept of variance. *Instructional Science*, 40, 651–672.
- Karplus, R. (1977). Science teaching and the development of reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 14, 169–175.
- Kennedy, D. (2013). The role of investigations in promoting inquiry-based science education in Ireland. *Science Education International*, 24(3), 282-305.
- Knippels, M. (2002). *Coping With the Abstract and Complex Nature of Genetics in Biology Education – The Yo-Yo Learning and Teaching Strategy*. Doctoral dissertation, Universiteit Utrecht. <http://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/219/full.pdf?sequence=2>.

BIBLIOGRAPHIE

- Kurth, L. A., & Roseman, J. (2001). *Findings From the High School Biology Curriculum Study: Molecular Basis of Heredity*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, St. Louis, MO.
- Lanie, A. D., Jayaratne, T. B., Sheldon, J. P., Kardia, S. L. R., Anderson, E. S., Feldbaum, M., & Petty, E. M. (2004). Exploring the public understanding of basic genetic concepts. *Journal of Genetic Counseling, 13*(4), 305–319.
- Lewis, J. (2014). From Flavr Savr tomatoes to stem cell therapy: Young people's understandings of gene technology, 15 years on. *Science & Education, 23*(2), 361–379. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9523-z>
- Lewis, J., & Kattmann U. (2004). Traits, genes, particles and information: Re-visiting students' understandings of genetics. *International Journal of Science Education, 26*(2), 195–206.
- Lewis, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance – Do students see any relationship? *International Journal of Science Education, 22*(2), 177–195.
- Lewontin, R. (1996). *Biology as Ideology: The Doctrine of DNA*. Toronto, ON : House of Anansi.
- Lukša, Ž., Radanović, I., Sertić Perić, M., & Garašić, D. (2016). Misconceptions of primary and high school students related to the biological concept of human reproduction, cell life cycle and molecular basis of heredity. *Journal of Turkish Science Education, 13*(3), 143–160. <http://tused.org/index.php/tused/article/view/644>

- Mamombe, A., Kazeni, M., & de Villiers, R. (2016). Context preferences of educators and learners for studying genetics: A case study in South Africa. *African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education*, 20(2), 165–174. <https://doi.org/10.1080/18117295.2016.1187509>
- Matthews, M. R. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York, NY : Routledge.
- Mierdel, J., & Bogner, F. X. (2020). Simply ingen(e)ious! How creative DNA modeling can enrich classic hands-on experimentation. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 21(2). <https://doi.org/10.1128/jmbe.v21i2.1923>
- Mikkilä-Erdmann, M. (2001). Improving conceptual change concerning photosynthesis through text design. *Learning and Instruction*, 11(3), 241–257.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2007). *Programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire, deuxième cycle*. Québec : Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2011). *La progression des apprentissages au secondaire*. Québec : Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation du Québec (2006). *Programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire, premier cycle*. Québec : Gouvernement du Québec.

BIBLIOGRAPHIE

- Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: A model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81(4), 405–424.
- National Research Council (1996). *National Science Education Standards*. Washington, DC : The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/4962>.
- National Research Council (2012). *A Framework For K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. Washington, DC : The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>.
- National Research Council (2013). *Next Generation Science Standards: For States, by States*. Washington, DC : The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18290>.
- Novak, J. D. (1977). *A Theory of Education*. Ithaca, NY : Cornell University Press.
- Okan, O., Bauer, U., Pinheiro, P., Sorensen, K., & Levin, D. (2019). *International Handbook of Health Literacy: Research, Practice and Policy across the Life-Span*. Bristol, UK : Policy Press.
- Osman, E., BouJaoude, S., & Hamdan, H. (2017). An investigation of Lebanese G7-12 students' misconceptions and difficulties in genetics and their genetics literacy. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(7), 1257–1280. <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9743-9>

- Parchmann, I., Grasei, C., Baer, A., Nentwig, P., Demuth, R., & Ralle, B. (2006). Chemie im kontext: A symbiotic implementation of a context-based teaching and learning approach. *International Journal of Science Education*, 28(9), 1041–1062.
- 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(2), 211–227.
- Potvin, P., & Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 54, 1121–1142. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Potvin, P., & Hasni, A. (2014). Interest, motivation and attitude towards science and technology at K-12 levels: A systematic review of 12 years of educational research. *Studies in Science Education*, 50(1), 85–129. <https://doi.org/10.1080/03057267.2014.881626>
- Potvin, P., Mercier, J., Charland, P., & Riopel, M. (2012). Does classroom explicitation of initial conceptions favour conceptual change or is it counter-productive? *Research in Science Education*, 42(3), 401–414. <https://doi.org/10.1007/s11165-010-9203-4>
- Reinagel, A., & Speth, E. B. (2016). Beyond the central dogma: Model-based learning of how genes determine phenotypes. *CBE–Life Sciences Education*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1187/cbe.15-04-0105>

BIBLIOGRAPHIE

- Rennie, L. J. (2014). Learning science outside of school. In N. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of Research on Science Education*, Volume II (pp. 134–158). New York, NY : Routledge.
- Roseman, J., Caldwell, A., Gogos, A., & Kurth, L. A. (2006). *Mapping a coherent learning progression for the molecular basis of heredity*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association of Research in Science Teaching, San Francisco, CA.
- Sadler, T. D., Chambers, F. W., & Zeidler, D. L. (2004). Student conceptualizations of the nature of science in response to a socioscientific issue. *International Journal of Science Education*, 26, 387–409.
- Sadler, T. D., & Fowler, S. R. (2006). A threshold model of content knowledge transfer for socioscientific argumentation. *Science Education*, 90(6), 986–1004.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2005). The significance of content knowledge for informal reasoning regarding socioscientific issues: Applying genetics knowledge to genetic engineering issues. *Science Education*, 89(1), 71–93.
- Sandoval, W. A. (2003). Conceptual and epistemic aspects of student scientific explanations. *Journal of the Learning Sciences*, 12(1), 5–51.
- Sandoval, W. A., & Morrison, K. (2003). High school student ideas about theory and theory change after a biological inquiry unit. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(4), 364–392.

- Scharfenberg, F.-J., Bogner, F. X., & Klautke, S. (2007). Learning in a gene technology lab with educational focus: Results of a teaching unit with authentic experiments. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 35, 28–39.
- Shea, N. A., & Duncan, R. G. (2013). From theory to data: The process of refining learning progressions. *Journal of the Learning Sciences*, 22(1), 7–32.
- Soylu, Y. N., Estrada-Villalta, S., & Adams, G. (2017). The (biological or cultural) essence of essentialism: Implications for policy support among dominant and subordinated groups. *Frontiers in Psychology*, 8, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00900>
- Stepans, J., Dyché, S., & Beiswenger, R. (1988). The effect of two instructional models in bringing about a conceptual change in the understanding of science concepts by prospective elementary teachers. *Science Education*, 72, 185–195.
- Stern, F., & Kampourakis, K. (2017). Teaching for genetics literacy in the post-genomic era. *Studies in Science Education*, 53(2), 193–225.
- Stern, F., Kampourakis, K., Delaval, M., & Müller, A. (2020). Development and validation of a questionnaire measuring secondary students' genetic essentialism and teleology (GET) conceptions. *International Journal of Science Education*, 42(2), 218–252. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1707905>.
- Tippett, C. D. (2010). Refutation text in science education: A review of two decades of research. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8, 951–970. <https://doi.org/10.1007/s10763-010-9203-x>

BIBLIOGRAPHIE

- Todd, A. N. (2013). *The Molecular Genetics Learning Progressions: Revisions and Refinements Based on Empirical Testing in Three 10th Grade Classrooms*. Doctoral dissertation, Wright State University, Dayton, OH.
- Treagust, D. F., & Duit, R. (2008). Conceptual change: A discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, 3(2), 297–328.
- Troutmann, N. M. (Ed.) (2013). *Citizen Science: 15 Lessons That Bring Biology to Life*. Arlington, VA : NSTA Press.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Wellington, J. (2000). *Teaching and Learning Secondary Science: Contemporary Issues and Practical Approaches*. London, UK : Routledge.
- Wolyniak, M. J. (2013). Improved student linkage of mendelian and molecular genetic concepts through a yeast-based laboratory module. *Biochemistry & Molecular Biology Education*, 41(3), 163–172. <https://doi.org/10.1002/bmb.20679>
- Zeidler, D. L., Walker, K. A., Ackett, W. A., & Simmons, M. L. (2002). Tangled up in views: Beliefs in the nature of science and responses to socioscientific dilemmas. *Science Education*, 86, 343–367.

Liste des articles recensés

- Ageitos, N., Puig, B., & Colucci-Gray, L. (2019). Examining reasoning practices and epistemic actions to explore students' understanding of genetics and evolution. *Science & Education*, 28, 1209–1233. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00086-6>
- Al khawaldeh, S. A. (2013). Prediction/discussion-based learning cycle versus conceptual change text: Comparative effects on students' understanding of genetics. *Research in Science & Technological Education*, 31(2), 168–183. <https://doi.org/10.1080/02635143.2013.811576>
- Annetta, L. A., Minogue, J., Holmes, S. Y., & Cheng, M.-T. (2009). Investigating the impact of video games on high school students' engagement and learning about genetics. *Computers & Education*, 53(1), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.12.020>
- Baumgartner, E., & Duncan, K. (2009). Evolution of students' ideas about natural selection through a constructivist framework. *American Biology Teacher*, 71(4), 218–227. <https://doi.org/10.2307/27669415>
- Ben-Nun, M. S., & Yarden, A. (2009). Learning molecular genetics in teacher-led outreach laboratories. *Journal of Biological Education*, 44(1), 19–25. <https://doi.org/10.1080/00219266.2009.9656187>

- Berne, B. (2014). Progression in ethical reasoning when addressing socio-scientific issues in biotechnology. *International Journal of Science Education*, 36(17), 2958–2977. <https://doi.org/10.1080/009500693.2014.941957>
- Bigler, A. M., & Hanegan, N. L. (2011). Student content knowledge increases after participation in a hands-on biotechnology intervention. *Journal of Science Education and Technology*, 20(3), 246–257. <https://doi.org/10.1007/s10956-010-9250-7>
- Boerwinkel, D. J., Knippels, M.-C., & Waarlo, A. J. (2011). Raising awareness of pre-symptomatic genetic testing. *Journal of Biological Education*, 45(4), 213–221. <https://doi.org/10.1080/00219266.2011.572987>
- Böttcher, F., & Meisert, A. (2013). Effects of direct and indirect instruction on fostering decision-making competence in socioscientific issues. *Research in Science Education*, 43(2), 479–506. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9271-0>
- Chowning, J. T., Wu, R., Brinkema, C., Crocker, W. D., Bass, K., & Lazerte, D. (2019). A new twist on DNA extraction. *The Science Teacher*, 86(6), 20–27.
- Christenson, N., Chang Rundgren, S.-N., & Hoglund, H.-O. (2012). Using the SEE-SEP model to analyze upper secondary students' use of supporting reasons in arguing socioscientific issues. *Journal of Science Education and Technology*, 21(3), 342–352. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9328-x>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Chu, Y.-C., & Reid, N. (2012). Genetics at school level: Addressing the difficulties. *Research in Science & Technological Education*, 30(3), 285–309. <https://doi.org/10.1080/02635143.2012.732059>
- Cook, M., Wiebe, E., & Carter, G. (2011). Comparing visual representations of dna in two multimedia presentations. *Journal of Educational Multimedia & Hypermedia*, 20(1), 21–42. <https://www.learntechlib.org/primary/p/36028/>
- Cox, C., Reynolds, B., Schunn, C., & Schuchardt, A. (2016). Using mathematics and engineering to solve problems in secondary level biology. *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 17(1), 22–30. <https://www.jstem.org/jstem/index.php/JSTEM/article/view/1858>
- Črne-Hladnik, H., Hladnik, A., Javornik, B., Košmelj, K., & Peklaj, C. (2012). Is judgement of biotechnological ethical aspects related to high school students' knowledge? *International Journal of Science Education*, 34(8), 1277–1296. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.572264>
- Dawson, E., Hill, A., Barlow, J., & Weitkamp, E. (2009). Genetic testing in a drama and discussion workshop: Exploring knowledge construction. *Research in Drama Education*, 14(3), 361–390. <https://doi.org/10.1080/13569780903072174>
- Dawson, V. M., & Venville, G. (2010). Teaching strategies for developing students' argumentation skills about socioscientific issues in high school genetics. *Research in Science Education*, 40(2), 133–148. <https://doi.org/10.1007/s11165-008-9104-y>

- Dawson, V. M., & Venville, G. (2013). Introducing high school biology students to argumentation about socioscientific issues. *Canadian Journal of Science, Mathematics & Technology Education, 13*(4), 356–372. <https://doi.org/10.1080/14926156.2013.845322>
- Donovan, B. M. (2014). Playing with fire? The impact of the hidden curriculum in school genetics on essentialist conceptions of race. *Journal of Research in Science Teaching, 51*(4), 462–496. <https://doi.org/10.1002/tea.21138>
- Donovan, B. M. (2016). Framing the genetics curriculum for social justice: An experimental exploration of how the biology curriculum influences beliefs about racial difference. *Science Education, 100*(3), 586–616. <https://doi.org/10.1002/sce.21221>
- Donovan, B. M. (2017). Learned inequality: Racial labels in the biology curriculum can affect the development of racial prejudice. *Journal of Research in Science Teaching, 54*(3), 379–411. <https://doi.org/10.1002/tea.21370>
- Donovan, B. M., Semmens, R., Keck, P., Brimhall, E., Busch, K. C., Weindling, M., Duncan, A., Stuhlsatz, M., Bracey, Z. B., Bloom, M., Kowalski, S., & Salazar, B. (2019a). Toward a more humane genetics education: Learning about the social and quantitative complexities of human genetic variation research could reduce racial bias in adolescent and adult populations. *Science Education, 103*(3), 529–560. <https://doi.org/10.1002/sce.21506>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Donovan, B. M., Stuhlsatz, M. A. M., Edelson, D. C., & Buck Bracey, Z. E. (2019b). Gendered genetics: How reading about the genetic basis of sex differences in biology textbooks could affect beliefs associated with science gender disparities. *Science Education*, 103(4), 719–749. <https://doi.org/10.1002/sce.21502>
- Donovan, B. M., Weindling, M., & Lee, D. (2020). From basic to humane genomics literacy: How different types of genetics curricula could influence anti-essentialist understandings of race. *Science & Education*, 29, 1479–1511. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00171-1>
- Duncan, R. G., & Tseng, K. A. (2011). Designing project-based instruction to foster generative and mechanistic understandings in genetics. *Science Education*, 95(1), 21–56. <https://doi.org/10.1002/sce.20407>
- Duncan, R. G., Castro-Faix, M., & Choi, J. (2016). Informing a learning progression in genetics: Which should be taught first, mendelian inheritance or the central dogma of molecular biology? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 14(3), 445–472. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9568-3>
- Duncan, R. G., Choi, J., Castro-Faix, M., & Cavera, V. L. (2017). A study of two instructional sequences informed by alternative learning progressions in genetics. *Science & Education*, 26(10), 1115–1141. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9932-0>
- Duncan, R. G., Freidenreich, H., Chinn, C., & Bausch, A. (2011). Promoting middle school students' understandings of molecular genetics. *Research in Science Education*, 41(2), 147–167. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9150-0>

- Eble, J., & Pecore, J. (2019). « Invasive aliens »: A student citizen-science activity using DNA barcoding to investigate concepts in ecology & molecular biology. *The American Biology Teacher*, 81(3) 169-174. <https://doi.org/10.1525/abt.2019.81.3.169>
- Eilam, B., & Reiter, S. (2014). Long-term self-regulation of biology learning using standard junior high school science curriculum. *Science Education*, 98(4), 705–737. <https://doi.org/10.1002/sce.21124>
- Ferdig, R., Blank, J., Kratcoski, A., & Clements, R. (2015). Using stereoscopy to teach complex biological concepts. *Advances in Physiology Education*, 39(3), 205–208. <https://doi.org/10.1152/advan.00034.2014>
- Foong, C.-C., & Daniel, E. G. S. (2013). Students' argumentation skills across two socio-scientific issues in a confucian classroom: Is transfer possible? *International Journal of Science Education*, 35(14), 2331–2355. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.697209>
- Franke, G., & Bogner, F. X. (2011a). Cognitive influences of students' alternative conceptions within a hands-on gene technology module. *Journal of Educational Research*, 104(3), 158–170. <https://doi.org/10.1080/00220671003636745>
- Franke, G., & Bogner, F. X. (2011b). Conceptual change in students' molecular biology education: Tilting at windmills? *Journal of Educational Research*, 104(1), 7-18. <https://doi.org/10.1080/00220670903431165>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Franke, G., & Bogner, F. X. (2013). How does integrating alternative conceptions into lessons influence pupils' situational emotions and learning achievement? *Journal of Biological Education*, 47(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/00219266.2012.716777>
- Franke, G., Scharfenberg, F.-J., & Bogner, F. X. (2013). Investigation of students' alternative conceptions of terms and processes of gene technology. *ISRN Education*, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/741807>
- Freidenreich, H. B., Duncan, R. G., & Shea, N. (2011). Exploring middle school students' understanding of three conceptual models in genetics. *International Journal of Science Education*, 33(17), 2323–2349. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.536997>
- Furberg, A., & Arnseth, H. C. (2009). Reconsidering conceptual change from a socio-cultural perspective: Analyzing students' meaning making in genetics in collaborative learning activities. *Cultural Studies of Science Education*, 4(1), 157–191. <https://doi.org/10.1007/s11422-008-9161-6>
- Gelbart, H., Brill, G., & Yarden, A. (2009). The impact of a web-based research simulation in bioinformatics on students' understanding of genetics. *Research in Science Education*, 39(5), 725–751. <https://doi.org/10.1007/s11165-008-9101-1>
- Gericke, N., & Wahlberg, S. (2013). Clusters of concepts in molecular genetics: A study of Swedish upper secondary science students' understanding. *Journal of Biological Education*, 47(2), 73–83. <https://doi.org/10.1080/00219266.2012.716785>

- Gericke, N., Hagberg, M., & Jorde, D. (2013). Upper secondary students' understanding of the use of multiple models in biology textbooks – The importance of conceptual variation and incommensurability. *Research in Science Education*, 43(2), 755–780. <https://doi.org/10.1007/s11165-012-9288-z>
- Goldschmidt, M., & Bogner, F. X. (2016). Learning about genetic engineering in an outreach laboratory: Influence of motivation and gender on students' cognitive achievement. *International Journal of Science Education, Part B: Communication and Public Engagement*, 6(2), 166–187. <https://doi.org/10.1080/21548455.2015.1031293>
- Grady, J. R., Dolan, E. L., & Glasson, G. E. (2010). Agriscience student engagement in scientific inquiry: Representations of scientific processes and nature of science. *Journal of Agricultural Education*, 51(4), 10–19. <https://doi.org/10.5032/jae.2010.04010>
- Granbom, M. (2016). Formative assessment and increased student involvement increase grades in an upper secondary school biology course. *Journal of Biological Education*, 50(2), 185–195. <https://doi.org/10.1080/00219266.2015.1028572>
- Güccük, A., & Köksal, M. S. (2017). The effect of case teaching on meaningful and retentive learning when studying genetic engineering. *Journal of Biological Education*, 51(2), 197–211. <https://doi.org/10.1080/00219266.2016.1182049>
- Haskel-Ittah, M., & Yarden, A. (2017). Toward bridging the mechanistic gap between genes and traits by emphasizing the role of proteins in a computational environment. *Science & Education*, 26(10), 1143–1160. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9927-x>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Haskel-Ittah, M., & Yarden, A. (2018). Students' conception of genetic phenomena and its effect on their ability to understand the underlying mechanism. *CBE—Life Sciences Education*, 17(3), 1–9. <https://doi.org/10.1187/cbe.18-01-0014>
- Hung, V., & Fung, D. (2017). The effectiveness of hybrid dynamic visualisation in learning genetics in a Hong Kong secondary school. *Research in Science & Technological Education*, 35(3), 308–329. <https://doi.org/10.1080/02635143.2017.1310095>
- Jarrett, K., Williams, M., Horn, S., Radford, D., & Wyss, J. M. (2016). «Sickle cell anemia: Tracking down a mutation»: An interactive learning laboratory that communicates basic principles of genetics and cellular biology. *Advances in Physiology Education*, 40(1), 110–115. <https://doi.org/10.1152/advan.00143.2015>
- Jittivadhna, K., Ruenwongsa, P., & Panijpan, B. (2010). Beyond textbook illustrations: Hand-held models of ordered DNA and protein structures as 3D supplements to enhance student learning of helical biopolymers. *Biochemistry & Molecular Biology Education*, 38(6), 359–364. <https://doi.org/10.1002/bmb.20427>
- Kampourakis, K., & Zogza, V. (2009). Preliminary Evolutionary Explanations: A basic framework for conceptual change and explanatory coherence in evolution. *Science & Education*, 18(10), 1313–1340. <https://doi.org/10.1007/s11191-008-9171-5>
- Khishfe, R. (2012a). Nature of science and decision-making. *International Journal of Science Education*, 34(1), 67–100. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.559490>

- Khishfe, R. (2012b). Relationship between nature of science understandings and argumentation skills: A role for counterargument and contextual factors. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(4), 489–514. <https://doi.org/10.1002/tea.21012>
- Kim, B., Pathak, S. A., Jacobson, M. J., Zhang, B., & Gobert, J. D. (2015). Cycles of exploration, reflection, and consolidation in model-based learning of genetics. *Journal of Science Education and Technology*, 24(6), 789–802. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9564-6>
- Kim, S. Y., & Irving, K. E. (2010). History of science as an instructional context: Student learning in genetics and nature of science. *Science & Education*, 19(2), 187–215. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9191-9>
- Knippels, M.-C. P. J., Severiens, S. E., & Klop, T. (2009). Education through fiction: Acquiring opinion-forming skills in the context of genomics. *International Journal of Science Education*, 31(15), 2057–2083. <https://doi.org/10.1080/09500690802345888>
- Langheinrich, J., & Bogner, F. X. (2015). Student conceptions about the DNA structure within a hierarchical organizational level: Improvement by experiment- and computer-based outreach learning. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 43(6), 393–402. <https://doi.org/10.1002/bmb.20888>
- Lin, C.-Y., Cheng, J.-H., & Chang, W.-H. (2010). Making science vivid: Using a historical episodes map. *International Journal of Science Education*, 32(18), 2521–2531. <https://doi.org/10.1080/09500691003746015>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Loftin, M., East, K., Hott, A., & Lamb, N. (2016). « Touching Triton »: Building student understanding of complex disease risk. *American Biology Teacher*, 78(1), 15–21. <https://doi.org/10.1525/abt.2016.78.1.15>
- Mathis, C. A., Siverling, E. A., Moore, T. J., Douglas, K. A., & Guzey, S. S. (2018). Supporting engineering design ideas with science and mathematics: A case study of middle school life science students. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 6(4), 424–442. <https://doi.org/10.18404/ijemst.440343>
- Mierdel, J., & Bogner, F. X. (2019a). Comparing the use of two different model approaches on students' understanding of DNA models. *Education Sciences*, 9(2), 1–18. <http://dx.doi.org/10.3390/educsci9020115>
- Mierdel, J., & Bogner, F. X. (2019b). Investigations of modellers and model viewers in an out-of-school gene technology laboratory. *Research in Science Education*, 51, 801–822. <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09871-3>
- Mierdel, J., & Bogner, F. X. (2019c). Is creativity, hands-on modeling and cognitive learning gender-dependent? *Thinking Skills and Creativity*, 31, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.11.001>
- Mihalca, L., Salden, R. J. C. M. ., Corbalan, G., Paas, F., & Miclea, M. (2011). Effectiveness of cognitive-load based adaptive instruction in genetics education. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.027>

- Nielsen, J. A. (2012a). Arguing from nature: The role of « nature » in students' argumentations on a *socio-scientific issue*. *International Journal of Science Education*, 34(5), 723–744. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.624135>
- Nielsen, J. A. (2012b). Co-opting science: A preliminary study of how students invoke science in value-laden discussions. *International Journal of Science Education*, 34(2), 275–299. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.572305>
- Nielsen, J. A. (2012c). Science in discussions: An analysis of the use of science content in socioscientific discussions. *Science Education*, 96(3), 428–456. <https://doi.org/10.1002/sce.21001>
- Nugteren, M. L., Jarodzka, H., Kester, L., & Van Merriënboer, J. J. G. (2018). Self-regulation of secondary school students: self-assessments are inaccurate and insufficiently used for learning-task selection. *Instructional Science*, 46(3), 357–381. <https://doi.org/10.1007/s11251-018-9448-2>
- Okoye, N. S., & Okechukwu, R. N. (2010). The effect of concept mapping and problem solving teaching strategies on achievement in biology among Nigerian secondary school students. *Education*, 131(2), 288–294.
- Pekel, F. O., & Hasenekoğlu, I. (2015). Dynamising conceptual change approach to teach some genetics concepts. *E-International Journal of Educational Research*, 6(2), 51–68. <https://doi.org/10.19160/e-ijer.39715>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Piksööt, J., & Sarapuu, T. (2014). Supporting students' knowledge transfer in modeling activities. *Journal of Educational Computing Research, 50*(2), 213–229. <https://doi.org/10.2190/EC.50.2.d>
- Poehnl, S., & Bogner, F. (2013). Cognitive load and alternative conceptions in learning genetics: Effects from provoking confusion. *Journal of Educational Research, 106*(3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/00220671.2012.687790>
- Premo, J., Cavagnetto, A., Honke, G., & Kurtz, K. J. (2019). Categories in conflict: Combating the application of an intuitive conception of inheritance with category construction. *Journal of Research in Science Teaching, 56*(1), 24–44. <https://doi.org/10.1002/tea.21466>
- Puig, B., Ageitos, N., & Jiménez-Aleixandre, M. P. (2017). Learning gene expression through modelling and argumentation: A case study exploring the connections between the worlds of knowledge. *Science & Education, 26*(10), 1193–1222. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9943-x>
- Rouzière, A.-S., & Redman, J. E. (2011). A practical workshop for generating simple DNA fingerprints of plants. *Biochemistry and Molecular Biology Education, 39*(3), 204–210. <https://doi.org/10.1002/bmb.20486>
- Scharfenberg, F.-J., & Bogner, F. X. (2010). Instructional efficiency of changing cognitive load in an out-of-school laboratory. *International Journal of Science Education, 32*(6), 829–844. <https://doi.org/10.1080/09500690902948862>

- Scharfenberg, F.-J., & Bogner, F. X. (2011). A new two-step approach for hands-on teaching of gene technology: Effects on students' activities during experimentation in an outreach gene technology lab. *Research in Science Education*, 41(4), 505–523. <https://doi.org/10.1007/s11165-010-9177-2>
- Scharfenberg, F.-J., & Bogner, F. X. (2013a). Instructional efficiency of tutoring in an outreach gene technology laboratory. *Research in Science Education*, 43(3), 1267–1288. <https://doi.org/10.1007/s11165-012-9309-y>
- Scharfenberg, F.-J., & Bogner, F. X. (2013b). Teaching gene technology in an outreach lab: Students' assigned cognitive load clusters and the clusters' relationships to learner characteristics, laboratory variables, and cognitive achievement. *Research in Science Education*, 43(1), 141–161. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9251-4>
- Schuchardt, A., & Schunn, C. (2015). Modeling scientific processes with mathematics equations enhances student qualitative conceptual understanding and quantitative problem solving. *Science Education*, 100(2), 290–320. <https://doi.org/10.1002/sce.21198>
- Shegog, R., Lazarus, M. M., Murray, N. G., Diamond, P. M., Sessions, N., & Zsigmond, E. (2012). Virtual transgenics: Using a molecular biology simulation to impact student academic achievement and attitudes. *Research in Science Education*, 42(5), 875–890. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9216-7>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Starbek, P., Erjavec, M. S., & Peklaj, C. (2010). Teaching genetics with multi-media results in better acquisition of knowledge and improvement in comprehension. *Journal of Computer Assisted Learning*, 26(3), 214–224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2009.00344.x>
- Stuhlsatz, M. A. M., Buck Bracey, Z. E., & Donovan, B. M. (2020). Investigating conflation of sex and gender language in student writing about genetics. *Science & Education*, 29, 1567–1594. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00177-9>
- Susantini, E., Sumitro, S. B., Corebima, A. D., & Susilo, H. (2018). Improving learning process in genetics classroom by using metacognitive strategy. *Asia Pacific Education Review*, 19(3), 401–411. <https://doi.org/10.1007/s12564-018-9540-y>
- Tenenbaum, H. R., To, C., Wormald, D., & Pegram, E. (2015). Changes and stability in reasoning after a field trip to a natural history museum. *Science Education*, 99(6), 1073–1091. <https://doi.org/10.1002/sce.21184>
- Todd, A., & Kenyon, L. (2016). Empirical refinements of a molecular genetics learning progression: The molecular constructs. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(9), 1385–1418. <https://doi.org/10.1002/tea.21262>
- Todd, A., Romine, W. L., & Cook Whitt, K. (2017). Development and validation of the learning progression-based assessment of modern genetics in a high school context. *Science Education*, 101(1), 32–65. <https://doi.org/10.1002/sce.21252>

- Toh, P. L. L., & Kapur, M. (2017). Is having more prerequisite knowledge better for learning from productive failure? *Instructional Science*, 45(3), 377–394. <https://doi.org/10.1007/s11251-016-9402-0>
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. (2010). Evaluating secondary students' scientific reasoning in genetics using a two-tier diagnostic instrument. *International Journal of Science Education*, 32(8), 1073–1098. <https://doi.org/10.1080/09500690902951429>
- Venville, G. J., & Dawson, V. M. (2010). The impact of a classroom intervention on grade 10 students' argumentation skills, informal reasoning, and conceptual understanding of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(8), 952–977. <https://doi.org/10.1002/tea.20358>
- Walan, S., & Rundgren, S.-N. C. (2015). Student responses to a context- and inquiry-based three-step teaching model. *Teaching Science*, 61(2), 33–39.
- Williams, M., DeBarger, A. H., Montgomery, B. L., Zhou, X., & Tate, E. (2012). Exploring middle school students' conceptions of the relationship between genetic inheritance and cell division. *Science Education*, 96(1), 78–103. <https://doi.org/10.1002/sce.20465>
- Williams, M., Montgomery, B. L., & Manokore, V. (2012). From phenotype to genotype: Exploring middle school students' understanding of genetic inheritance in a Web-based environment. *American Biology Teacher*, 74(1), 35–40. <https://doi.org/10.1525/abt.2012.74.1.8>

LISTE DES ARTICLES RECENSÉS

- Wu, J.-Y., Tung, Y.-N., Hwang, B.-C., Lin, C.-Y., Che-Di, L., & Chang, Y.-T. (2014). Do knowledge arrangements affect student reading comprehension of genetics? *American Biology Teacher*, 76(3), 184–188. <https://doi.org/10.1525/abt.2014.76.3.6>
- Yang, C., Jen, C.-H., Chang, C.-Y., & Yeh, T.-K. (2018). Comparison of animation and static-picture based instruction: Effects on performance and cognitive load for learning genetics. *Educational Technology & Society*, 21(4), 1–11.
- Yarden, H., & Yarden, A. (2010). Learning using dynamic and static visualizations: Students' comprehension, prior knowledge and conceptual status of a biotechnological method. *Research in Science Education*, 40(3), 375–402. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9126-0>
- Yilmaz, D., Tekkaya, C., & Sungur, S. (2011). The comparative effects of prediction/discussion-based learning cycle, conceptual change text, and traditional instructions on student understanding of genetics. *International Journal of Science Education*, 33(5), 607–628. <https://doi.org/10.1080/09500691003657758>



L'avènement de la génétique moderne et les développements fulgurants qui en ont découlé, comme la génomique, la médecine de précision et le ciseau moléculaire, nous forcent à revoir la façon dont cette science fondamentale est enseignée dans nos écoles, particulièrement au secondaire.

Ce rapport de recherche présente une recension systématique de 10 ans de travaux en sciences de l'éducation portant sur l'enseignement de la génétique au secondaire, afin de mettre en évidence les meilleures pratiques fondées sur des données probantes. Cet ouvrage et les conclusions auxquelles il arrive intéresseront les personnes enseignantes, les personnes conceptrices de matériel didactique, ainsi que celles et ceux qui réfléchissent à l'avenir des programmes d'enseignement de la génétique au Québec et ailleurs dans le monde.

ISBN 978-2-9817238-1-9



9

782981

723819