



IDÉES DE SCIENCE, IDÉES SUR LA SCIENCE

Pour enseigner les sciences de la maternelle à la 3^e.
Pour éclairer la mise en œuvre du Socle commun.

**Sous la direction de Wynne Harlen,
présenté par Pierre Léna**

Derek Bell, Rosa Devés, Hubert Dyasi,
Guillermo Fernández de la Garza,
Pierre Léna, Robin Millar, Michael Reiss,
Patricia Rowell & Wei Yu



[EDUCATION LE POMMIER !]

Idées de sciences, idées sur la science

**Pour enseigner les sciences
de la maternelle à la 3^e**

**Pour éclairer la mise en œuvre
du Socle commun**

Relecteur: Valérie Gautheron
Mise en pages: Marina Smid

Ce livre est paru en anglais sous le titre *Working with Big Ideas
of Science Education* © Wynne Harlen, 2015

Édition française © Éditions Le Pommier, 2015

Tous droits réservés
ISBN: 978-2-7465-0932-0

8, rue Férou 75006 Paris
www.editions-lepommier.fr

Derek Bell, Rosa Devés, Hubert Dyasi,
Guillermo Fernández de la Garza,
Pierre Léna, Robin Millar, Michael
Reiss, Patricia Rowell & Wei Yu

Idées de sciences, idées sur la science

**Pour enseigner les sciences
de la maternelle à la 3^e**

**Pour éclairer la mise en œuvre
du Socle commun**

**sous la direction
de Wynne Harlen**

présenté par Pierre Léna

traduit de l'anglais

par Mathieu Labonde



[ÉDUCATION LE POMMIER !]

PRÉFACE

En octobre 2009 s'est tenu un modeste séminaire international, dont l'objectif était le suivant : identifier les notions-clés que les élèves doivent fréquenter durant leur éducation à la science pour être capables de comprendre le monde de la nature, d'en tirer plaisir, profit et émerveillement. Le programme scolaire de sciences, pléthorique et hétéroclite, fut désigné comme l'une des raisons pour lesquelles les élèves perçoivent la science comme une série de faits sans lien entre eux et sans grande signification. Une des solutions consisterait à concevoir les buts de l'éducation à la science, non en termes de connaissance d'un corpus de faits et de théories, mais comme une progression vers la compréhension d'idées-clés, de « notions-clés » (*big ideas*), en rapport avec la vie des élèves pendant et après l'école. Le séminaire et le travail qui suivit, en groupe, aboutirent à la publication de *10 notions-clés pour enseigner les sciences, de la maternelle à la 3^e*, ouvrage libre de droits,

traduit en plusieurs langues, qui fut reçu avec intérêt dans le monde entier.

Cinq ans plus tard, les raisons identifiées dans un premier temps comme étant favorables au développement des notions-clés de science restent vraies, mais d'autres ont émergé, rendant la démarche plus nécessaire encore. Un deuxième séminaire international, avec les mêmes participants auxquels s'adjoignit un nouvel expert de la réforme des programmes scolaires, fut donc convoqué pour reconsidérer les travaux précédents. Ce séminaire, qui eut lieu en septembre 2014, était financé par une généreuse subvention du ministère de l'Éducation du Mexique dans le cadre de son programme INNOVEC, par des subventions allouées par les institutions dont dépendent certains des participants et par des dons personnels. Durant deux jours et demi, les participants jouèrent un rôle actif en séminaire, puis dans le travail de révision et d'amélioration de ce texte. Les interventions et les débats firent l'objet d'un compte-rendu détaillé. Comme en 2009, l'éventail des expériences et des cultures des différents membres du groupe assurera, nous l'espérons, la validité et la pertinence de ce travail pour l'éducation à la science dans les différentes régions du monde.

Pour cet effort commun, nos remerciements vont au groupe d'experts : Derek Bell, Rosa Devés, Hubert Dyasi, Guillermo Fernández de la Garza, Louise Hayward, Pierre Léna, Robin Millar, Michael Reiss,

PRÉFACE

Patricia Rowell et Wei Yu, ainsi qu'à Juliet Miller
(rapporteuse).

Wynne Harlen

PRÉSENTATION DE L'ÉDITION FRANÇAISE

Succédant à un premier ouvrage, paru en France en 2011 sous le titre *10 notions-clés pour enseigner les sciences, de la maternelle à la 3^e*, voici donc un deuxième volume, considérablement remanié et approfondi, portant sur le même thème : comment, dans un monde en profond changement, face à une jeunesse qui change beaucoup elle aussi, enseigner les sciences à tous les élèves, aux plus comme aux moins doués, aux moins gâtés par la naissance et l'environnement comme à ceux dont l'origine sociale paraît garantir l'avenir ?

Après des décennies d'immobilité, le collège, en France, connaît, en ce milieu d'année 2015, l'aube de ce qui pourrait être le premier moment d'une profonde transformation. À coup sûr, le besoin est urgent. Les idées-forces de la réforme engagée sont simples : davantage d'autonomie pour les professeurs, plus d'interdisciplinarité pour abattre les cloisons entre disciplines,

plus d'égalité entre élèves devant le savoir et l'orientation professionnelle, plus de continuité entre école primaire et collège. À mon sens, c'est très exactement ce dont ont besoin nos élèves, nos professeurs, nos établissements scolaires. Si chacun s'accorde à le reconnaître, beaucoup divergent sur la méthode, mais ce n'est pas ici le propos d'en examiner les détails. Toutefois, après vingt années (1995-2015) consacrées à développer un enseignement rénové de la science à l'école et au collège avec *La main à la pâte*, après avoir créé en 2012 le réseau national des neuf *Maisons pour la science au service des professeurs*, mes partenaires et moi-même sommes convaincus qu'enseigner autrement la science peut puissamment servir les objectifs de la réforme, car nous avons éprouvé depuis vingt ans la cohérence et la pertinence de cette méthode.

Aussi ce livre vient-il à point nommé pour tenter d'éclairer nos collègues professeurs, nos amis chercheurs ou ingénieurs, les parents qui s'interrogent sur cette réforme, les autorités de l'éducation avec lesquelles nous n'avons cessé de collaborer ou dont, parfois, nous avons contesté les choix... Pour ses enfants scolarisés, notre pays vient de promulguer un nouveau *Socle commun de connaissances, de compétences et de culture* et de nouveaux programmes sont parus ou imminents pour les quatre cycles triennaux organisant la scolarité, depuis la maternelle jusqu'à la sortie du collège en fin de classe de troisième. Dans chacun de

ces cycles, les sciences de la nature, les technologies (ou « sciences de l'ingénieur ») ont leur place. Au sein de leur enseignement, nous voulons organiser l'autonomie plus grande des professeurs autour de l'évaluation (formative) qu'ils font de leur pédagogie ou de celle (sommativ) qui mesure les résultats des élèves et leur est communiquée ; dessiner de façon précise et fortement interdisciplinaire les idées DE science que l'on peut souhaiter connues et comprises par chaque citoyen ; ne pas faire de ces contenus un catalogue de notions aussi vite oubliées qu'apprises, mais une participation à la formidable aventure humaine qu'est la science depuis la nuit des temps. Mais aussi acquérir des idées SUR la science, en comprenant comment elle s'est construite, en réfléchissant à ce qu'elle est dans la pratique des élèves, dans ses modes de découverte et de raisonnement, son processus de vérification, les valeurs éthiques qu'elle met en jeu et la confiance que peuvent mériter ses assertions. La rédaction de ce livre, manifeste l'universalité de la science, puisqu'il résulte d'un travail auquel Amérique latine et du Nord, Chine et Europe ont contribué.

Voici l'apport que nous espérons de cet ouvrage, lequel demeure encore bien modeste face aux ambitieuses transformations requises, celle de la pratique de nos collègues, celle du développement professionnel des professeurs d'école et de collègue, et des outils pour l'assurer. Je reconnais que les contenus de connaissances

qu'il propose et organise, les progressions qu'il dessine depuis la maternelle sont encore trop limités aux sciences dites « fondamentales », première étape pourtant indispensable. À l'avenir, il faudra mieux inclure les sciences de l'ingénieur et la jeune science informatique, mieux dialoguer avec les mathématiques, mieux retracer les panoramas historiques de l'aventure scientifique, approfondir la façon dont les sciences cognitives et la révolution numérique peuvent modifier la pédagogie... Toutes questions déjà brûlantes et qui donnent peut-être rendez-vous à un troisième volume ?

Introduisant le premier volume en 2011, j'évoquais déjà l'idée de ce *Grand Récit* épique, dessiné par la science, que propose avec constance Michel Serres comme un outil de réconciliation de notre époque avec elle-même et avec l'universel. Ce Récit, si on le conte, tisse ensemble ces dix idées DE science que nous proposons à la jeunesse de nos écoles comme bagage indispensable. Par son ampleur et sa vérité, ce Récit illustre aussi les quatre idées SUR la science qui fondent sa puissance et, espérons-le, son bon usage face aux défis de l'avenir. Construire progressivement dans nos classes ce Récit grâce à une pratique de l'observation, de l'expérimentation, du raisonnement, et l'énoncé dans la clarté de notre langue, quelle belle ambition pour notre école !

Puisse cet essai, traduit avec talent par Mathieu Labonde, nourrir le bonheur de faire des sciences et

inspirer chez ses lecteurs francophones le désir d'expé-
rimer et d'enrichir les idées qui guidèrent sa rédac-
tion collective. Puisse-t-il également inspirer l'action
des Maisons pour la science au service des professeurs,
créés par la Fondation *La main à la pâte*, ainsi que les
Écoles supérieures du professorat et de l'éducation.

Pierre Léna
Membre de l'Académie des sciences
Président d'honneur
de la Fondation *La main à la pâte*

Note: le lecteur trouvera en fin d'ouvrage (p. 167-171) des notes
explicitant le parti pris lors de la traduction de certains termes
de l'édition originale en anglais. Parfois ces termes sont rappelés
entre parenthèses dans la présente traduction.

AVANT-PROPOS

Quel savoir essentiel tous les étudiants devraient-ils acquérir en science, au cours de leur scolarité obligatoire ? Ce livre a l'ambition de mettre à jour les conclusions des auteurs sur cette question. Il est publié cinq ans après *10 notions-clés pour enseigner les sciences* (2010), premier ouvrage écrit en réaction à ce constat inquiétant : de nombreux élèves ne trouvaient pas leurs cours de science intéressants, ni reliés de façon pertinente à leur vie. Le problème venait en partie de programmes surchargés, apparaissant comme une suite de faits déconnectés. En conséquence, une partie de la réponse consistait à concevoir les objectifs de l'éducation à la science non plus comme l'apprentissage d'un corpus de faits et de théories, mais plutôt comme une progression vers la compréhension d'idées-clés mises en relation avec la vie des élèves, que ce soit durant leurs années d'école ou après. Nous avons identifié ces idées ou « notions-clés » comme

celles devant être comprises par tous les élèves, non seulement par ceux qui persistent dans l'étude des sciences ou choisissent une activité liée aux sciences après leur scolarité, mais aussi par tous les autres, quels que soient leur sexe, leur bagage culturel ou leur handicap.

Issu d'un séminaire international ayant réuni en 2009 des experts scientifiques et des spécialistes de l'éducation aux sciences, le livre *10 notions-clés pour enseigner les sciences* identifiait de grands principes directeurs, dix notions-clés de science et quatre notions-clés sur la science et ses applications. Le présent ouvrage, *Idées de science, idées sur la science*, né d'un nouveau séminaire ayant réuni le même groupe pour un travail plus approfondi, ajoute aux travaux précédents une exposition plus détaillée de la démarche nécessaire pour travailler dans le sens des notions-clés, ainsi que leurs implications sur le contenu des programmes, la pédagogie, l'évaluation des étudiants et la formation des enseignants.

À côté de l'importance toujours actuelle des facteurs liés à la façon dont élèves et enseignants perçoivent les sciences, lesquels ont motivé ce travail au départ, plusieurs autres facteurs peuvent être identifiés, en relation avec les avantages potentiels peuvent en attendre la société et que les élèves en tant qu'individus, dans une période où la nécessité d'innovation est soulignée par tous. Pour un individu en plein apprentissage,

être capable de saisir les éléments essentiels des faits ou des phénomènes du monde qui l'entoure est un avantage qui lui permettra de prendre des décisions avisées concernant son bien-être, sa propre santé et celle des autres. Quant à la société, elle a tout à gagner de citoyens prenant des décisions informées sur des sujets tels que l'utilisation de l'énergie ou la protection de l'environnement.

L'éducation à la science doit également prendre en compte les changements survenus dans le monde du travail – qui exigent la capacité à rapprocher science, savoir de l'ingénieur, technologie et les mathématiques (STEM¹) –, l'urgence de l'attention nécessaire à des enjeux mondiaux majeurs tels que les impacts négatifs du changement climatique, l'influence positive et négative du mode d'évaluation des élèves, et la contribution grandissante des neurosciences à la compréhension de l'apprentissage. Tous ces éléments accroissent les raisons de développer des notions-clés aptes à fournir un cadre à l'éducation à la science.

Tout en affirmant dans les principes qui suivent, les objectifs multiples de l'éducation à la science, notre attention se concentrera ici sur la compréhension conceptuelle et sur le développement des capacités et

1. En anglais, *Science, Technology, Engineering, Mathematics*. STEM est un acronyme international très utilisé que nous conservons dans le texte français, voir note 2.

des comportements scientifiques, au sein d'une pédagogie appropriée plutôt que de listes d'objectifs. Les idées (ou notions-clés) DE science et SUR la science sont exprimées sous une forme narrative suivant la progression qui construit leur compréhension tout au long des années, depuis le début du cycle primaire jusqu'à la fin du secondaire.

La mise en pratique de ces principes et notions-clés est considérée en relation avec la sélection des contenus, la pédagogie, l'évaluation des élèves et la formation des enseignants. En ce qui concerne la pédagogie, nous montrons que l'investigation joue un rôle central dans le développement de la compréhension, mais aussi qu'il est nécessaire d'identifier les notions-clés en science pour promouvoir une éducation à la science basée sur l'investigation. Le dernier chapitre, portant sur la « mise en place des notions-clés », étudie les conditions nécessaires pour faire évoluer les pratiques, y compris dans la façon dont les idées sont exprimées dans les programmes de sciences, dans le développement de la compréhension des notions-clés par les professeurs et dans la manière d'évaluer l'enseignement de ces notions-clés.

1

INTRODUCTION ET INTENTIONS

Introduction

Depuis la publication de *10 notions-clés pour enseigner les sciences*, en 2010, l'éducation en général et l'éducation à la science en particulier ont connu une évolution rapide. Les élèves utilisent les technologies numériques en classe et en dehors, de nouveaux cadres pour les programmes sont mis en place, les ordinateurs servent désormais à étendre le champ de l'évaluation. Dans le même temps, la compréhension des mécanismes de l'apprentissage a progressé, ainsi que les moyens de les favoriser.

Des bouleversements plus grands encore, avec des conséquences considérables sur l'éducation, interviennent dans le monde du travail, où la technique a rendu certaines tâches inutiles. L'employabilité diminue pour les métiers à qualification moyenne, et il reste les tâches difficiles à automatiser, pour la plupart des emplois peu qualifiés ou très qualifiés, pour

lesquels des capacités proprement humaines sont requises. Pour beaucoup, la capacité de créer de nouveaux produits, de résoudre des problèmes et d'entreprendre des tâches complexes sera, au moins pendant un temps, la seule voie qui permette d'éviter le chômage et ses conséquences sociales. La mondialisation de l'économie présente de nouvelles opportunités mais aussi de nouveaux défis, en particulier pour les habitants des régions du monde moins capables de ces rapides changements que connaissent les pays plus développés.

La réussite, dans cette époque d'innovation, passe par la capacité à saisir les éléments essentiels de problèmes très variés, à reconnaître des structures significatives, à identifier et à appliquer un savoir pertinent. L'éducation à la science peut potentiellement favoriser ces qualités nécessaires, en se concentrant sur la valorisation d'idées puissantes et efficaces, des idées de science comme des idées sur la nature de l'activité scientifique elle-même, et sur ses applications. Ce constat justifie amplement de revisiter les notions-clés identifiées en 2010, en particulier en ce qui concerne l'évolution nécessaire des pratiques éducatives.

Enfin, les défis mondiaux auxquels l'humanité est confrontée – le changement climatique, la santé, l'accroissement de la population – créent un besoin urgent de jeunes adultes dotés à la fois d'un minimum de compréhension des idées scientifiques, des enjeux

techniques et éthiques, et d'une capacité de raisonner suffisante.

Passons maintenant en revue les arguments justifiant l'importance d'identifier les notions-clés, avec les défis et les bénéfices qui les accompagnent.

Intentions

En 2010, nous indiquions pour quelles raisons il importait de rendre explicites les buts que toute éducation à la science devrait se donner :

- répondre aux élèves qui perçoivent la science comme un ensemble de faits fragmentés et de théories sans aucun intérêt pour eux, en élaborant les idées au sein d'une représentation cohérente du fonctionnement du monde naturel ;
- fournir une base pour des activités en classe qui aident les élèves à expliquer ce qu'ils jugent important ;
- fournir une base pour choisir parmi l'énorme éventail de contenus de programmes possibles ;
- guider le développement de programmes scolaires bâtis sur une progression vers l'acquisition des notions-clés.

Ces buts restent valables, mais il faut aujourd'hui en ajouter d'autres, brièvement discutés ici et étoffés plus loin. Ils suivent trois axes :

- l'adoption généralisée d'une pédagogie fondée sur l'investigation, pour éduquer à comprendre et à connaître la science ;

- la reconnaissance des connexions entre les sciences et les autres savoirs STEM² dans le contexte de la vie quotidienne ;
- une meilleure compréhension, grâce aux neurosciences, des circonstances qui influencent l'apprentissage.

L'éducation à la science par l'investigation

La pédagogie fondée sur l'investigation a été adoptée, quant au principe, dans le monde entier et soutenue dans la dernière décennie par un nombre croissant de recherches sur son efficacité. Quand les élèves apprennent la science par l'investigation, leur compréhension

2. STEM: Science, Technologie, Ingénierie et Mathématiques. C'est-à-dire:

Science: idées sur le monde naturel, garanties par l'évidence empirique, leur cohérence et leur capacité prédictive, accumulées au cours du temps, et processus par lesquels ces idées ont été conçues.

Technologie: systèmes, procédés et objets produits par les êtres humains pour satisfaire leurs besoins et leurs désirs. La technologie crée souvent un dispositif particulier (un médicament, un circuit électronique intégré).

Ingénierie: méthode systématique et itérative, innervée par la science, de conception d'objets et de systèmes en réponse aux problèmes humains. L'ingénierie traite volontiers d'un système global – la conception d'un avion, d'un pont, d'un stimulateur cardiaque – en utilisant nombre de technologies spécifiques distinctes.

Mathématiques: étude systématique des structures et des relations entre les quantités, les nombres et l'espace, exprimée symboliquement sous forme de nombres, de symboles et de formes, et légitimée par un raisonnement logique.

passer par leur propre activité mentale et physique, à partir de leurs idées existantes, en collectant, en analysant et en interprétant des éléments d'évidence (*evidence*), et les amène à formuler des idées scientifiques plus puissantes pour expliquer de nouveaux faits ou de nouveaux phénomènes. Cette application du socioconstructivisme en pédagogie amène les élèves à travailler en suivant des méthodes similaires à celles des scientifiques et à mieux prendre conscience de la nature même de l'activité scientifique. Bien que tous les apprentissages scientifiques ne passent pas nécessairement par l'investigation, ou ne s'y prêtent pas, celle-ci joue un rôle-clé en aidant les élèves à comprendre. Cependant, la mise en pratique de l'investigation prend beaucoup de temps. Il faut donc choisir les sujets et les activités permettant de tirer le meilleur parti d'un temps d'apprentissage limité et précieux. C'est pourquoi la sélection des idées-forces les plus efficaces pour la compréhension du monde qui nous entoure est le corollaire à toute mise en place sérieuse d'une approche pédagogique par l'investigation durant les années de scolarité obligatoire, typiquement entre cinq et seize ans.

Connexions avec la vie quotidienne

Les situations où la science est mise en œuvre dans la vie de tous les jours, et qui sont susceptibles de capter l'intérêt de nombreux élèves, combinent souvent les sciences avec d'autres sujets, en particulier l'ingénierie,

la technologie et les mathématiques. L'évolution du monde du travail et de la recherche demande de plus en plus de former des équipes multidisciplinaires ou transdisciplinaires pour s'attaquer à une large gamme de problèmes scientifiques ayant des conséquences pour la société. Les situations et les problèmes du monde réel – la conception de sources d'énergie durables, l'ingénierie biomédicale, le maintien de la biodiversité dans les régions où les besoins locaux et globaux entrent en conflit – exigent des savoirs, des concepts et des compétences issus de plusieurs disciplines. Une compréhension générale de ces questions et de leurs implications éthiques est nécessaire à chaque citoyen lorsque la volonté politique vise une mobilisation collective pour résoudre les problèmes qui se présentent. Ces considérations questionnent la manière d'assurer un enseignement pertinent aux élèves, qu'ils soient destinés ou non à être employés plus tard dans des entreprises de pointe.

Pouvoir identifier les relations entre différentes idées de sciences et comprendre des notions-clés et la façon dont elles ont vu le jour est par conséquent une part importante de la préparation au travail et à la vie. Une éducation qui permette aux élèves de croiser les idées à l'intérieur d'un domaine et entre les domaines encourage la créativité et l'innovation. Plutôt qu'à les subir, elle prépare les étudiants à prendre part aux changements rapides qui touchent les métiers et les moyens

de communication, développés par l'ingénierie et les applications de la science.

*Neurosciences et recherches
sur les processus de cognition*

Les recherches sur l'activité du cerveau découvrent à un rythme élevé de nouveaux facteurs favorables à un apprentissage efficace. L'un de ces facteurs nous paraît particulièrement pertinent : les idées connectées entre elles sont plus rapidement mobilisées dans une situation nouvelle que les idées isolées. Cette découverte soutient l'idée qu'il vaut mieux travailler en direction de quelques notions-clés qui permettent de comprendre le monde et notre expérience en son sein, plutôt qu'avec une série d'éléments de savoirs déconnectés. Savoir créer des connexions et identifier des structures permet aux élèves de reconnaître les aspects significatifs lorsqu'ils cherchent à comprendre de nouvelles situations. L'imagerie cérébrale révèle à quel point l'appréhension de nouvelles idées s'accompagne d'une réaction émotionnelle, ce qui montre que le plaisir est associé à la compréhension. Une pédagogie qui comporte des temps d'apprentissage en groupes et l'observation de personnes plus expérimentées est également confortée par la découverte de l'activité des neurones miroirs. Si des affirmations extravagantes et non validées sont parfois avancées en faveur de la contribution des neurosciences à l'éducation, il est très vraisemblable que

plus de recherches scientifiques vont progressivement paraître, avec des applications directes dans les classes, qui concernent non seulement l'éducation à la science, mais également d'autres domaines.

Défis

Admettre ces arguments forts en faveur d'un enseignement centré sur les notions-clés ne suffit pas. Il est également important de reconnaître que l'évolution de ces dernières années engendre de nouveaux défis à relever, ou plutôt de nouveaux obstacles à abattre si l'on veut que les élèves aient une chance de développer leur compréhension. Deux défis majeurs concernent l'évaluation des élèves et la formation des enseignants.

Évaluation de l'élève

Dans de nombreux pays, les tests d'évaluation et leurs résultats sont de plus en plus utilisés pour définir les objectifs des enseignants et des écoles, avec la croyance fautive que cela améliorera la qualité de l'apprentissage. Les tests conventionnels et les examens posent une série de questions sans rapport les unes avec les autres, ce qui encourage l'enseignement de notions détachées les unes des autres. Pour soutenir et évaluer efficacement la progression vers les notions-clés, il faut donc passer par un changement fondamental de la manière dont les mesures des capacités des élèves sont conçues,

collectées et utilisées. À défaut, l'impact de l'évaluation sur ce qui est enseigné, et sur la manière de l'enseigner, continuera de freiner, et même d'étrangler, les tentatives d'apporter aux élèves les moyens de développer des capacités et des savoirs-clés.

Formation des enseignants

Quand ils préparent leurs cours, les enseignants doivent garder en tête la façon dont l'objectif de chaque leçon individuelle s'emboîte dans un ensemble supérieur d'idées plus amples, grâce auxquelles les élèves donnent sens à un large éventail de phénomènes et de faits. En gardant cette direction générale à l'esprit, les enseignants disposent d'un cadre pour observer les activités, les questions et les paroles des élèves. Ce cadre structure aussi leurs décisions, le retour qu'ils donnent aux élèves et leur façon d'adapter leur enseignement, grâce à l'évaluation formative, pour encourager l'apprentissage de l'élève. C'est un défi pour les maîtres de l'école primaire, qui doivent enseigner toutes les matières, mais également pour les enseignants du secondaire, qui enseignent parfois tous les domaines de la science mais n'en ont étudié qu'un ou deux en profondeur. L'éducation à la science reçue par de nombreux enseignants à l'école manquait d'investissement dans l'activité scientifique et ne leur a pas donné l'opportunité de travailler avec les notions-clés. Le développement professionnel des enseignants doit donc

pallier ce manque et leur donner cette expérience, afin qu'ils soient équipés pour aider leurs propres élèves à progresser vers la compréhension de ces notions.

Bénéfices pour l'individu et pour la société

Si nous relevons ces défis, les étudiants en tant qu'individus et la société dans son ensemble en tireront des avantages importants. Les avantages pour les élèves sont semblables à ceux qu'offre tout programme d'études bien conçu. En science, cela inclut la satisfaction d'être capable de donner sens au monde et d'appréhender la nature de l'activité scientifique et son impact sur nos vies. Bénéfice supplémentaire : des idées efficaces, applicables dans une grande variété d'expériences, donnent la capacité de saisir les aspects essentiels d'un fait ou d'un phénomène, même sans avoir connaissance de leurs moindres détails. Comprendre les divers aspects du monde aide les individus dans les décisions affectant leur santé, leur bien-être dans leur milieu de vie et leurs choix professionnels. L'habitude de questionner, de chercher des éléments de preuve (*evidence*) et des réponses, d'échanger son point de vue avec d'autres contribue aussi à renforcer la confiance et le respect envers soi-même et envers les autres. En outre, la satisfaction d'être capable de discerner des structures dans différentes situations, ainsi que les connexions entre elles, est un facteur de motivation

pour l'apprentissage, tant durant l'éducation proprement dite que par la suite.

Des bénéfices apparaissent également pour la société quand les jeunes gens font des choix mieux informés, en tant qu'élèves ou dans leur vie ultérieure, lorsqu'il s'agit, par exemple, de leur alimentation, d'exercice physique, de gestion de l'énergie ou de protection de l'environnement. Au-delà de leurs effets sur la vie quotidienne, ces questions ont des implications plus larges pour l'avenir, en raison de leur impact à long terme sur l'environnement. Comprendre comment la science est à l'œuvre dans bien des aspects de la vie est nécessaire pour rendre justice à son importance et pour reconnaître la nécessité d'un bon usage de la connaissance scientifique. Les étudiants doivent savoir comment, dans le présent et dans le passé, l'utilisation de la connaissance scientifique par l'ingénierie et la technologie peut avoir à la fois des conséquences positives et négatives sur la société. L'éducation à la science a la responsabilité de susciter la compréhension et la volonté de s'attaquer aux problèmes qui génèrent des inégalités de richesse, d'emploi, de santé et d'éducation dans le monde entier.

2 PRINCIPES

La volonté de mettre l'accent sur les idées fondamentales de la science implique certains principes liés à l'éducation aux sciences. Énoncer ceux-ci explicitera clairement les valeurs et les critères qui nous ont guidés dans notre choix des notions-clés et de la manière de les mettre en pratique. Après avoir passé en revue les principes précédemment formulés dans *10 notions-clés pour enseigner les sciences*, nous n'avons trouvé aucune raison de les changer de façon substantielle. Cependant, il nous a semblé préférable de les reformuler ici avec plus de concision et aussi clairement que possible, par rapport à des aspects précis de l'éducation à la science.

Principes concernant les buts de l'éducation à la science

Tout au long de la scolarité obligatoire, les écoles devraient, dans leurs programmes d'éducation à la science, systématiquement chercher à développer et à encourager la curiosité des élèves, le plaisir pris dans l'activité scientifique et, dans l'explication des phénomènes naturels, favoriser la compréhension du « comment » et du pourquoi.

L'éducation à la science devrait donner à tous les élèves des chances égales de prendre part de manière informée aux décisions et aux actions, qui concernent leur bien-être, celui des autres et l'environnement. Elle devrait donc viser :

- la compréhension d'un petit nombre de notions-clés de science qui incluent des idées de science et des idées sur la science et ses applications ;
- des compétences scientifiques concernant la recherche et l'utilisation des éléments d'évidence (*evidence*) ;
- des attitudes et des comportements scientifiques.

L'éducation à la science doit développer la curiosité des élèves et leur capacité d'émerveillement et de questionnement en s'appuyant sur leur inclination naturelle à vouloir comprendre le monde qui les entoure. La recherche en science doit être présentée aux élèves comme une activité pratiquée par tout le monde, y compris eux. Lorsque les élèves font eux-mêmes

l'expérience de comprendre et de relier à une nouvelle, cela ne leur apporte pas seulement du plaisir et une satisfaction personnelle, mais cela leur fait également comprendre qu'ils peuvent augmenter leurs connaissances par une investigation active. Le processus et le résultat de cette activité scientifique peuvent produire une réponse émotionnelle positive qui servira alors de motivation à l'étape suivante d'apprentissage.

Pour les élèves en tant qu'individus, l'éducation à la science permet de développer la compréhension, la puissance de raisonnement et les comportements grâce auxquels ils mèneront une vie plus saine et plus gratifiante, physiquement et émotionnellement. Elle leur donne les moyens, à titre personnel et en groupe, de faire des choix mieux éclairés pour éviter, par exemple, le gaspillage de l'énergie et des autres ressources naturelles, la pollution, les inconvénients d'un mauvais régime alimentaire, le manque d'exercice physique ou l'abus de médicaments.

Grâce à l'éducation à la science, les étudiants devraient appréhender les notions-clés concernant les objets, les phénomènes, les matériaux et leurs relations dans la nature. L'éducation à la science est également censée développer les notions-clés sur l'investigation scientifique, le raisonnement, les méthodes de travail, ainsi que les idées sur les relations entre les sciences, la technologie, la société et l'environnement. Bien que les notions-clés DE science (issues de l'activité scientifique)

et SUR la science (comment nous concevons et utilisons la science) soient le sujet principal de ce livre, les buts de l'éducation à la science devraient inclure aussi le développement de compétences et de comportements proprement scientifiques.

Principes concernant le choix des activités éducatives

Les programmes d'études doivent indiquer une progression claire en direction des buts de l'éducation à la science, laquelle doit être fondée sur la base des recherches actuelles et sur la compréhension de la manière dont s'effectue l'apprentissage. La progression vers les notions-clés doit provenir de l'étude de sujets à la fois intéressants et pertinents par rapport à la vie d'élèves de toutes origines. La diversité parmi les élèves doit servir à améliorer l'apprentissage de tous.

Les activités d'apprentissage doivent permettre aux élèves de faire l'expérience de la science et de l'investigation scientifique en accord avec la pensée scientifique et pédagogique d'aujourd'hui. Elles doivent approfondir la compréhension des idées scientifiques tout en poursuivant éventuellement d'autres buts, tels que l'encouragement de certaines attitudes et de certaines capacités.

Les enfants viennent à l'école avec des idées déjà bien établies sur le monde, qui résultent de leurs actions, de leurs observations, de leurs réflexions dans

leur vie quotidienne. Des élèves d'origines différentes devraient avoir la possibilité d'apprendre grâce à des activités qui les intéressent et font écho à leur expérience.

Toute progression vers des objectifs devrait être innervée par ce que l'on sait de la conduite et de la nature de cette progression, et en particulier par ce qu'on est en droit d'attendre des élèves, en termes de savoir, de compréhension, de savoir-faire et de raisonnement, à différents moments de leur formation scolaire.

Ceux qui apprennent trouvent généralement très difficile d'apprendre tout en comprenant lorsqu'il leur faut partir de tâches dont la signification ne leur est pas apparente. Ils apprennent plus rapidement lorsqu'ils peuvent relier leurs expériences nouvelles à ce qu'ils savent déjà et lorsque la curiosité les pousse à répondre aux questions. Cela implique d'élaborer des activités qui permettent aux élèves de se confronter à des objets et des problèmes réels. Les façons d'enseigner et d'apprendre doivent donc être suffisamment souples pour laisser la place à différentes expériences et à ce que des situations particulières ont à offrir afin que les centres d'intérêt et les questionnements des élèves puissent servir de points de départ vers des objectifs qui demeurent communs.

La science devrait apparaître aux élèves comme une volonté de comprendre, et non comme une collection de

faits et de théorèmes dont la justesse a été démontrée. Elle devrait être présentée comme une boîte à outils d'explications des phénomènes naturels, que le consensus général s'accorde à juger comme tirant le meilleur parti des évidences (*evidence*) disponibles. Elle devrait être vue comme le résultat d'une aventure humaine, mettant en jeu la créativité et l'imagination autant que la collecte et l'interprétation minutieuses de données.

Principes concernant l'évaluation de l'élève

L'évaluation joue un rôle primordial dans l'éducation à la science et devrait en fin de compte améliorer l'apprentissage dans tous les cas.

L'évaluation formative de l'apprentissage des élèves et l'évaluation sommative de leurs progrès doivent s'appliquer à tous les objectifs.

L'évaluation formative devrait être utilisée de façon constante tout au long du processus d'enseignement et d'apprentissage, afin que les élèves identifient les buts de l'activité, soient capables de juger leurs performances et orientent leurs efforts en conséquence. L'évaluation sommative se soucie, bien sûr, du contrôle et du bilan de ce qui est appris, mais elle devrait être effectuée de telle manière qu'elle encourage l'apprentissage et évite les effets négatifs souvent associés aux évaluations à grands enjeux (par exemple passer dans les classes supérieures).

Dans la mesure où ce qui est évalué est censé refléter ce qu'il est important de savoir, il est essentiel de ne pas se limiter à ce qui peut être évalué le plus facilement. Un éventail de méthodes variées doit être utilisé pour rassembler et interpréter les évidences (*evidence*) concernant ce qui est su, de telle sorte que les élèves puissent montrer ce qu'ils savent faire pour chacun des objectifs qui leur sont proposés. Il est également important d'admettre que, pour diverses raisons inévitables (la fragmentation des performances et autres défauts inhérents aux instruments d'évaluation), l'évaluation des savoirs acquis est toujours une approximation.

Principes concernant les enseignants et les écoles

Les programmes d'apprentissage des élèves, de même que la formation initiale et le développement professionnel des enseignants, doivent être cohérents avec les méthodes d'enseignement et d'apprentissage requises pour atteindre les différents objectifs de l'éducation à la science.

En vue de ces objectifs, les programmes scolaires de sciences doivent promouvoir la coopération entre enseignants, les liens avec la société et l'engagement des scientifiques.

La formation initiale et continue des enseignants doit reconnaître que ces enseignants, en tant qu'élèves eux-mêmes, ont également besoin d'une expérience directe de l'activité scientifique et de son langage, à leur propre

niveau. Leur formation doit donc inclure plusieurs formes d'investigation scientifique personnelle, suivies d'une réflexion sur le rôle du maître, qui permette la compréhension à la fois des notions scientifiques et du processus de la science elle-même.

Il est également important de créer des occasions pour les enseignants de travailler avec le tissu social local, et en particulier avec la communauté scientifique. Améliorer l'éducation à la science, énorme défi, exige la coopération des éducateurs et des scientifiques. Les enseignants doivent pouvoir améliorer d'abord leur propre connaissance des sciences, en passant, par exemple, par une formation professionnelle continue à laquelle les scientifiques participent et en partageant leur expérience entre eux lors de cours ou de conférences. L'information sur les applications de la science peut venir de personnes impliquées dans l'industrie ou dans les activités parascientifiques implantées localement. En permettant aux étudiants en science de niveau universitaire ou à des scientifiques professionnels de fournir un soutien en ligne ou de rencontrer les élèves, pour travailler directement avec eux, compléter leur apprentissage et renforcer les enseignants dans leur domaine d'étude, on offre à la communauté scientifique la possibilité de contribuer à l'amélioration de l'éducation en science, tout en permettant à chacun de mieux comprendre ce que peut être une pédagogie efficace pour l'éducation à la science, à tous les niveaux.

3

RÉVISION DES NOTIONS-CLÉS : EXTENSION, AMPLEUR ET IDENTIFICATION

Les sciences sont complexes. Comment pouvons-nous attendre des étudiants qu'ils comprennent ne serait-ce que le début du large spectre d'idées, de théories et de principes qui paraissent nécessaires pour saisir cette complexité? Une piste: écouter les experts scientifiques expliquant le fonctionnement du monde à des non-experts. Ils isolent les (quelques) idées essentielles qui expliquent un phénomène précis et laissent de côté tous les détails qui éparpillent l'attention. Par exemple, un physicien montrera comment deux idées-clés, la deuxième loi de Newton et la loi universelle de la gravitation, suffisent à expliquer pourquoi les satellites et les vaisseaux spatiaux tournent autour de la Terre et permettent de calculer les vitesses nécessaires pour

envoyer ces engins sur orbite ou les ramener sur Terre. Nous ne suggérons pas que ces idées-clés doivent être enseignées directement et nous ne nions pas que la construction d'idées adéquates exige d'assembler un grand nombre de « petites idées » provenant d'expériences d'apprentissage très variées. Mais nous sommes convaincus que le fait de relier ces expériences à des notions-clés fournit la compréhension dont les élèves ont besoin pour donner du sens à leur observation du monde. En outre, comme nous le disions plus haut, cette compréhension rendra ces élèves capables de saisir les enjeux réels des décisions basées sur la science, qui affectent leur bien-être et celui des autres.

La réalisation, ou non, des bénéfices attendus dépend bien sûr du choix des idées. Pour cela, deux points sont importants :

- l'extension des idées convient : ou non de prendre en considération les comportements et les dispositions à l'égard de la science, et ce qu'on appelle les talents, les pratiques, les compétences ou les capacités, au même titre que les idées scientifiques proprement dites ;
- l'ampleur des idées : quel champ de phénomènes ces idées doivent-elles expliquer, en sachant que plus une idée est générale, plus elle s'éloigne du phénomène particulier et plus elle paraît par conséquent abstraite.

Extension des idées

L'éducation à la science dépasse la simple compréhension conceptuelle, comme nous l'avons dit dans les principes concernant ses buts (voir p. 32). Outre les idées relatives au fonctionnement du monde, l'éducation à la science vise d'autres objectifs, parmi lesquels le développement :

- de la compréhension de la nature de la science ;
- des capacités requises pour s'engager dans la recherche scientifique ;
- de comportements scientifiques et de comportements informés à l'égard de la science ;
- de la conscience des liens existant entre la science et d'autres domaines, en particulier la technologie, le savoir de l'ingénieur et les mathématiques.

Tout en reconnaissant que l'éducation à la science devrait tendre à ces divers aboutissements, le choix que nous avons fait de nous concentrer sur les notions-clés De science et SUR la science dérive de notre conviction que les idées jouent un rôle central dans tous les aspects de cette éducation. Le développement de la compréhension est un objectif commun à toutes les activités de l'éducation à la science. Les capacités et les pratiques liées à l'investigation scientifique, comme les comportements et les dispositions scientifiques, sont développés par l'implication dans des activités dont le contenu engage le raisonnement scientifique : sans quoi

on aurait du mal à parler d'« activités » scientifiques. Même si l'on souligne avec insistance les comportements liés, par exemple, à la prudence avec laquelle les données doivent être interprétées, ou à la façon d'organiser une investigation scientifique, il n'en reste pas moins que l'activité renverra également à une ou plusieurs idées scientifiques, puisque ces qualités ne sont pas développées en dehors d'un contenu scientifique. Cet argument ne réfute pas la valeur d'éventuelles listes d'attitudes ou de compétences, ni le travail explicite en faveur de leur acquisition, en même temps que le travail sur une compréhension conceptuelle, mais il rappelle ce principe : toutes les activités, en science, doivent approfondir la compréhension d'idées scientifiques, tout en poursuivant d'autres objectifs.

Comprendre la nature de la science

Nous voulons également que les élèves comprennent les processus de l'activité scientifique tout autant que les idées auxquelles elle conduit : c'est-à-dire la manière dont les idées qui expliquent les choses dans le monde alentour se sont formées, et non seulement ce qu'elles sont. En effet, on peut difficilement envisager de séparer la connaissance concernant l'activité scientifique de la connaissance des idées scientifiques elles-mêmes. Sans savoir comment ces idées se sont formées, l'apprentissage de la science supposerait l'acceptation aveugle de nombreuses idées sur la nature, qui

paraissent contredire le sens commun. Dans un monde toujours plus dépendant des applications de la science, le grand public peut se sentir impuissant, s'il est privé des moyens d'évaluer la qualité des informations sur lesquelles s'appuient les explications. En science, cette évaluation concerne les méthodes utilisées pour collecter, analyser et interpréter les données destinées à éprouver les théories. Questionner les affirmations scientifiques à la base nous permet, à nous tous, de rejeter celles qui s'appuient sur de fausses preuves et de reconnaître celles qui utilisent les évidences ou preuves raisonnables avec discernement pour venir en appui à des affirmations ou des choix précis. C'est une dimension essentielle de l'utilisation de la connaissance scientifique, quand il s'agit de prendre des décisions, concernant par exemple l'utilisation des ressources naturelles.

*Capacité à s'impliquer
dans une investigation scientifique*

Participer à une investigation scientifique permet aux élèves de formuler des idées sur la science et sur la manière dont les idées naissent de l'activité scientifique. La principale caractéristique d'une telle activité, c'est la tentative de répondre à une question dont les élèves ne connaissent pas la réponse ou d'expliquer quelque chose qu'ils ne comprennent pas. Il peut s'agir d'une question posée par les élèves, mais, comme il n'est pas très réaliste de supposer que les étudiants travaillent

toujours sur leurs propres questions, le talent du professeur consiste aussi à introduire des problèmes de telle sorte que les élèves se les approprient. La réponse à certains problèmes peut être découverte par une recherche de première main, mais pour d'autres, des informations de seconde main sont nécessaires. Dans les deux cas, le point important est que les évidences servent à tester les idées, et illustrent cette notion : les résultats dépendront des évidences réunies et de la façon de les interpréter. Par conséquent, les capacités mises en œuvre dans la conduite d'une investigation scientifique ont un rôle-clé dans la formation des idées, et la pédagogie qui encourage le développement des notions-clés doit également promouvoir le développement de l'investigation en tant que compétence, ainsi que la confiance dans ses résultats. Nous y reviendrons au chapitre 5.

Le contexte STEM

La question du rapport entre les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STEM) se pose, dans la mesure où l'explication des situations de la vie quotidienne combine souvent ces domaines. À tel point que, dans la plupart des cas où l'on fait référence à la « science » dans la vie de tous les jours, il serait plus juste de parler de la technologie ou de l'ingénierie. Une intégration plus poussée des domaines STEM dans les programmes éducatifs faciliterait ensuite la pratique

professionnelle sur les lieux de travail ou de recherche, et capterait plus efficacement l'attention et l'implication personnelle des élèves. Les recherches en sciences cognitives apportent un argument supplémentaire en faveur d'un certain degré d'intégration : elles suggèrent que les connaissances connectées sont plus immédiatement disponibles, et appliquées dans une situation nouvelle, que les éléments de connaissance dispersés. Cependant, les quelques recherches existant sur l'intégration des sciences avec d'autres matières suggèrent qu'au niveau de l'école primaire, il est parfois contre-productif de chercher à établir des connexions si les idées propres à chaque matière ne sont pas connues de façon sûre. Plutôt qu'essayer d'enseigner les matières STEM de manière intégrée, les avantages à les aborder ensemble seraient plus sûrs si les programmes scolaires planifiaient et coordonnaient les sujets et les thèmes communs.

Ampleur des idées

La difficulté d'établir des connexions entre les matières apparaît aussi au moment de répondre à cette question : quelle ampleur donner aux notions-clés ? Nous définissons ainsi les notions-clés : des idées utilisables pour expliquer et prédire un large ensemble de phénomènes dans le monde naturel. L'ampleur des idées explicatives peut varier : pour chaque idée qui s'applique

à quelques phénomènes, il existe en général une idée plus vaste, s'appliquant à un plus grand nombre de phénomènes connexes, elle-même, à son tour, englobée dans une idée plus grande et plus complète. Par exemple, le phénomène d'une substance se dissolvant dans une autre, comme le sucre dans l'eau, est « expliqué » par un jeune enfant en ces termes : le sucre a disparu. Cette idée naïve doit être adaptée pour rendre compte du fait que le sucre est toujours dans l'eau, et devient alors « plus grande » quand on explique que certaines choses ne se dissolvent pas dans l'eau et que d'autres la colorent mais ne peuvent pas être vues autrement. Ensuite, l'idée de dissolution doit être encore élargie pour s'appliquer à d'autres liquides et à d'autres solides. Cette explication peut ensuite être reliée à d'autres phénomènes et expliquée en termes d'interactions au niveau moléculaire.

Le processus consistant à connecter des idées entre elles pour en former de plus grandes se poursuit en théorie jusqu'à un petit nombre de concepts englobants, ou même à un concept unique qui expliquerait tout. Des idées de cette sorte seraient très abstraites, éloignées de l'expérience réelle, et parfois sembleraient moins efficaces pour expliquer ces expériences que des idées liées à des faits particuliers ou à des phénomènes de façon plus évidente. Elles ne se contentent pas de franchir les frontières entre disciplines, comme le font les idées dites « interdisciplinaires », mais elles

masquent ces frontières et sont donc plutôt transdisciplinaires. Parmi elles, nous trouvons des idées comme celles de système, de symétrie, de causalité, de forme et de fonction, ou de structure.

Notre décision de positionner les notions-clés au niveau interdisciplinaire, sous le niveau encore plus général de concepts englobants transdisciplinaires, s'est imposée en considérant les besoins des élèves et de leurs enseignants. La discussion autour de concepts transdisciplinaires est envisageable avec les meilleurs élèves de dix-huit ans, mais elle convient mieux encore à des étudiants universitaires. Pour l'écolier, qui entamera ou non une carrière à dominante scientifique, des idées moins générales, en lien plus direct avec son expérience, paraissent plus utiles. À ce niveau, l'éducation à la science doit plutôt aider tous les élèves à développer les notions-clés, mais il faut garder à l'esprit la différence entre une déclaration d'intention et la meilleure manière d'atteindre les objectifs. Une décomposition plus poussée en idées plus petites est évidemment possible, mais risque de rompre les liens entre les petites idées, qui leur permettent de se fondre dans une grande idée cohérente.

Identifier les notions-clés

Cette approche de l'éducation à la science, comme travail axé sur le développement des notions-clés, a été très bien

reçu, et même chaleureusement – sur le principe. Afin de déterminer quels changements seraient éventuellement nécessaires pour les idées exposées dans *10 notions-clés pour enseigner les sciences*, nous avons d’abord passé en revue les critères sur lesquels était basé notre choix. Nous avons constaté qu’ils étaient toujours valables, c’est-à-dire que les notions-clés doivent :

- détenir un pouvoir explicatif en relation avec un grand nombre d’objets, faits et phénomènes rencontrés par les élèves durant et après leurs années de scolarité ;
- fournir une base de compréhension des problèmes dans lesquels la décision prise engage la santé et le bien-être de l’élève, des autres et de l’environnement, par exemple l’utilisation de l’énergie ;
- mener au plaisir et à la satisfaction de répondre (ou de trouver les réponses) aux questions qu’on se pose sur soi-même et sur le monde naturel ;
- avoir une importance culturelle – c’est-à-dire avoir un effet sur la représentation de la condition humaine – en évoquant les grands accomplissements de l’histoire des sciences, l’inspiration puisée dans l’étude de la nature et les impacts de l’activité humaine sur l’environnement.

Revenir ainsi sur notre sélection de notions-clés n’a pas révélé la nécessité de grands changements, mais confirmé que cette sélection passait avec succès le test d’une « lecture par nos pairs » informelle. En même temps, il est apparu clairement que le chemin était long

avant que cette approche devienne évidente dans la pratique de classe ou dans la formation des maîtres. Il s'avère nécessaire d'accorder une plus grande attention à la façon de travailler en pratique avec les notions-clés, ainsi qu'à leurs conséquences sur le contenu des programmes, la pédagogie et l'évaluation des élèves.

Même si nous reconnaissons que d'autres notions-clés pourraient être proposées, il nous a semblé que les modifier à ce stade, alors qu'elles commencent tout juste à être utilisées, ne serait pas d'une grande aide. De plus, bien que les idées ne soient pas présentées de manière identique dans les textes cadres des programmes scolaires publiés récemment, il existe des similarités entre les objectifs implicites de nombreux programmes publiés de par le monde. C'est pourquoi, après avoir passé en revue les critères selon lesquels nous avons choisi ces notions-clés, puis examiné les choix alternatifs possibles, nous avons décidé de limiter le changement à quelques reformulations, et nous avons confirmé notre liste de dix notions-clés DE science et de quatre notions-clés SUR la science, telle qu'elle existait déjà.

Les pages qui suivent résument ces notions-clés, que tous les élèves devraient avoir la possibilité de rencontrer et d'apprendre au cours de leur scolarité obligatoire. Dans le chapitre 4, ces idées seront formulées plus longuement, de façon plus narrative, avec une description de leur progression tout au long de la scolarité.

Notions-clés de science

1. Toute la matière du monde est constituée de particules de taille minuscule.

Les atomes sont les constituants élémentaires de toute matière vivante ou non vivante. Le comportement des atomes, souvent organisés en molécules, explique les propriétés des différentes sortes de matière. Les réactions chimiques correspondent à des réarrangements des atomes entre substances pour en former de nouvelles. Chaque atome possède un noyau contenant des neutrons et des protons, entourés d'électrons. Les charges électriques opposées des protons et des électrons s'attirent mutuellement, donnant aux atomes leur stabilité et permettant la formation de molécules et de substances variées.

2. Certains objets peuvent avoir un effet sur d'autres objets situés à distance des premiers.

Tous les objets agissent à distance sur d'autres objets, sans entrer en contact avec eux. Dans certains cas, comme pour le son et la lumière, l'effet résulte d'un rayonnement qui se déplace depuis la source jusqu'au récepteur. Dans d'autres, l'action à distance s'explique par l'existence d'un champ de force entre les objets, un champ magnétique ou un champ gravitationnel, par exemple. La gravitation est une force universelle d'attraction qui s'exerce entre tous les objets, des plus grands aux plus petits. Elle maintient

les planètes en orbite autour du Soleil et elle cause la chute des objets qui nous entourent vers le centre de la Terre.

3. Pour modifier le mouvement d'un objet, il faut qu'une force agisse sur lui.

La force exercée sur un objet n'est pas directement visible, mais elle est décelable grâce à son effet sur le mouvement ou sur la forme de l'objet. Lorsqu'un objet est immobile, les forces qui agissent sur lui sont égales en intensité et opposées en direction, s'équilibrant entre elles. La gravitation affectant tous les objets sur la Terre, il existe toujours une force opposée à la gravité lorsqu'un objet est immobile. Le déséquilibre des forces modifie le mouvement de l'objet dans la direction de la force résultant de leur combinaison. Lorsque les forces opposées agissant sur un objet ne sont pas alignées, elles provoquent la rotation ou la torsion de l'objet. Cet effet est utilisé dans des machines simples.

4. La quantité totale d'énergie présente dans l'Univers demeure toujours la même, mais elle est parfois transférée d'un mode de stockage à un autre au cours d'un événement.

Bien des processus ou des événements consistent en des changements au cours du temps, et cela requiert de l'énergie pour se produire. L'énergie

peut être transférée d'un corps à un autre de bien des manières. Dans de tels processus, une partie de l'énergie est transformée en une forme moins facile à utiliser. L'énergie ne peut ni être créée ni être détruite. L'énergie des carburants fossiles, une fois libérée par la combustion en présence d'oxygène, se dégrade en une forme plus difficile à utiliser.

5. La composition de la Terre et de son atmosphère détermine sa surface et son climat.

La surface de la Terre s'échauffe sous le rayonnement solaire, ce qui provoque des courants de convection dans l'air et dans les océans et crée ainsi les climats. Sous la surface, la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre produit des mouvements dans les roches fondues. La surface solide change constamment par le jeu de la formation et de l'érosion des roches.

6. Le Système solaire représente une minuscule partie d'un Univers formé de milliards de galaxies.

Autour du Soleil tournent en orbite huit planètes et d'autres objets plus petits, l'ensemble formant le Système solaire. Le jour, la nuit et les saisons s'expliquent par l'orientation et la rotation de la Terre dans son mouvement autour du Soleil. Le Système solaire fait partie d'une galaxie d'étoiles, de gaz et de poussières, une parmi les milliards présentes dans l'Univers, à des distances considérables les unes des

autres. Un grand nombre d'étoiles possèdent des planètes.

7. Les organismes vivants sont tous organisés à partir de cellules et ont une durée de vie limitée.

Tous les organismes vivants sont constitués d'une ou de plusieurs cellules. Les organismes multicellulaires possèdent des cellules différenciées selon leur fonction. Toutes les fonctions de base de la vie résultent de ce qui se produit à l'intérieur des cellules, dont l'ensemble constitue un organisme. La croissance résulte généralement de multiples divisions cellulaires.

8. Pour subsister, les organismes vivants ont besoin d'énergie et de matière, pour lesquelles ils sont souvent en compétition ou en dépendance vis-à-vis d'autres organismes.

La nourriture fournit aux organismes matière et énergie, maintenant ainsi les fonctions de base de la vie et permettant la croissance. Certaines plantes et bactéries peuvent utiliser directement l'énergie du Soleil pour produire des molécules complexes. Les animaux se fournissent en énergie en dissociant les molécules complexes de leur nourriture et dépendent en fin de compte des plantes vertes pour ce faire. Dans un écosystème, il peut y avoir compétition pour l'énergie et la matière nécessaires à la vie et à la reproduction.

9. L'information génétique est transmise d'une génération d'organismes vivants à la suivante.

L'information génétique au sein d'une cellule est contenue dans la molécule d'ADN sous forme d'un code à quatre lettres. Les gènes déterminent le développement et la structure des organismes. Dans la reproduction asexuée, tous les gènes du descendant viennent d'un parent unique. Dans la reproduction sexuée, chaque parent apporte la moitié des gènes.

10. La diversité des espèces, vivantes ou éteintes, est le résultat d'une évolution.

Toute vie aujourd'hui sur Terre descend directement d'un ancêtre commun universel qui était un organisme simple à cellule unique. Des modifications génétiques, survenues au cours d'un grand nombre de générations successives, ont abouti à la biodiversité. Les organismes incapables de s'adapter suffisamment aux changements de leur environnement ont disparu.

Notions-clés sur la science

11. La science recherche la cause ou les causes des phénomènes du monde naturel.

La science veut expliquer et comprendre les phénomènes du monde naturel. Il n'existe pas une méthode scientifique unique pour atteindre ce but.

La diversité des phénomènes naturels exige une grande diversité de méthodes et d'instruments pour produire les explications scientifiques et tester leur validité. Une explication énonce souvent les facteurs nécessaires pour qu'un événement se produise, comme le montrent les évidences issues de l'observation et de l'expérimentation. Dans d'autres cas, l'identification de la cause est fondée sur les corrélations révélées par l'observation systématique de structures répétitives.

12. Les explications scientifiques, les théories et les modèles acceptés constituent la meilleure représentation possible des faits connus à un moment donné.

Une théorie scientifique ou un modèle décrivant les relations entre des variables ou des composants d'un système doivent être en accord avec les observations disponibles à un moment donné et conduire à des prédictions pouvant être testées. Toute théorie, tout modèle est donc provisoire, susceptible de révision à la lumière de nouvelles données, même si précédemment il a pu conduire à des prévisions en accord avec les données alors disponibles. Chaque modèle possède ses points forts et ses limites lorsqu'il rend compte des observations.

13. Les connaissances produites par la science sont utilisées dans les technologies afin de créer des produits qui servent des buts définis par l'homme.

L'application de notions scientifiques par les techniques a conduit à de profonds changements dans bien des aspects de l'activité humaine. Les progrès des technologies permettent de nouvelles avancées scientifiques qui permettent à leur tour d'accroître les connaissances sur le monde naturel et de satisfaire la curiosité des hommes pour celui-ci. Dans certains domaines de l'activité humaine, les technologies précèdent les notions scientifiques, mais dans d'autres, et le plus souvent aujourd'hui, ces notions précèdent les technologies.

14. Les applications de la science ont, bien souvent, des implications éthiques, sociales, économiques et politiques.

L'usage des connaissances scientifiques par les technologies a rendu possibles de très nombreuses innovations. Décider du caractère souhaitable ou non de telle ou telle application particulière de la science ne relève pas du seul jugement scientifique. Des jugements éthiques et moraux peuvent alors intervenir, fondés par exemple sur des considérations de justice, d'équité, de protection de l'être humain ou d'impact sur la société et son environnement.

4

PROGRESSION ET DÉVELOPPEMENT DES NOTIONS-CLÉS

Le développement de la compréhension des notions-clés en science est un processus graduel qui se poursuit tout au long de l'éducation et au-delà. Il part d'idées petites, locales et liées au contexte, qui se forment durant l'étude d'un phénomène particulier. Il met en jeu le raisonnement inductif et déductif. L'apparition de structures et de régularités au cours des observations peut susciter des questions sur ce qui est en train de se passer, mais les réponses possibles à ces questions proviennent d'hypothèses tirées des expériences antérieures, impliquant un saut créatif pour relier les nouvelles observations aux observations précédentes. Quand les élèves utilisent les idées tirées d'un événement pour expliquer un fait connexe, ils sont plus facilement capables de formuler des explications qui s'appliquent à plusieurs contextes. À mesure que les

idées s'affranchissent du contexte, elles deviennent nécessairement plus abstraites.

Pour chaque élève, individuellement, il existe une progression qui mène des idées initiales, formées à partir de son expérience personnelle et propres à celle-ci, vers des idées plus puissantes qui expliquent un plus grand nombre de faits connexes. Quantité de recherches sur les idées qui sont propres aux élèves montrent qu'à leur entrée à l'école, ceux-ci ont déjà des idées sur le monde qui, pour la plupart, ne sont guère en accord avec une vision scientifique. Il est peu probable que le chemin vers des idées plus scientifiques soit le même pour chaque individu, dans la mesure où ce chemin dépend de l'expérience de chacun et de l'aide qu'il a reçue pour comprendre ces idées. Disposer d'une description de la progression – comment les idées changent au cours du temps – est important pour concevoir à la fois le déroulement des programmes et la manière d'utiliser l'évaluation en vue de renforcer et de constater l'apprentissage. Plus que tout cependant, il importe que les enseignants perçoivent le lien entre les expériences éducatives faites à divers moments de la scolarité et l'objectif global qu'est la compréhension des notions-clés.

Les concepts de la progression

Comment allons-nous décrire la progression des idées, depuis celles que les élèves ont formées durant leur

jeune âge et qui se révèlent à l'école, jusqu'aux notions-clés que nous voulons qu'ils possèdent en quittant l'école? Nous avons trouvé trois modèles principaux de progression dans les idées, selon les manières dont les objectifs pédagogiques sont exposés dans les programmes.

Le premier modèle, le plus courant, assimile implicitement la progression à l'ascension d'une échelle, où chaque échelon doit être franchi avant le suivant. Chaque échelon est défini comme une cible d'apprentissage. La hauteur de chaque échelon varie selon les modèles : une année, plusieurs années, plusieurs étapes. Cette approche donne l'impression d'un développement linéaire figé avec une progression vue comme une série d'étapes distinctes, chacune avec son propre point final, mais sans forcément de lien avec la compréhension globale des notions-clés.

Le deuxième modèle consiste à décrire seulement dans sa globalité l'objectif visé, qui peut être atteint de différentes façons, un peu à la manière de pièces de puzzle qu'on pourrait assembler dans n'importe quel ordre. Ce modèle a l'inconvénient de ne donner qu'une orientation très vague aux enseignants et aux concepteurs de programmes dans la sélection des expériences pédagogiques les plus pertinentes.

Le troisième modèle éclate les objectifs globaux en branches. Les idées portées par chaque branche sont développées graduellement au cours du temps,

souvent en suivant un programme en spirale. Mais le risque est réel de perdre de vue, entre les idées situées sur des branches différentes, les connexions qui les lient pour en faire des idées plus grandes.

Chaque modèle a ses avantages et ses inconvénients, et un petit quelque chose de chacun d'entre eux est probablement nécessaire, puisque la nature et l'étendue des expériences requises pour développer une idée varient d'une idée à l'autre. En particulier, les idées personnelles initiales des élèves les conduisent parfois à concevoir des notions séparées pour expliquer ce qui relève pourtant foncièrement du même phénomène, rencontré dans des contextes différents. (Par exemple, tout en étant prêts à expliquer que l'exposition à l'air et au soleil aide les vêtements mouillés à sécher, ils peuvent expliquer la disparition de flaques d'eau sur la route par l'infiltration de l'eau dans le sol.) Il faut les aider à établir des connexions, afin qu'ils voient qu'une idée plus scientifique s'applique dans les deux cas (modèle du puzzle). Dans d'autres cas, les idées des élèves s'appuient sur une expérience limitée (« Tous les bois flottent »), et celle-ci a besoin d'être élargie pour les conduire à une idée plus largement applicable (modèle de la spirale). Le raisonnement des élèves peut très bien être limité, de telle sorte qu'ils ne relèvent que les évidences qui confirment leur idée ou se cramponnent à une idée, en dépit de toutes les évidences contraires, parce qu'il leur manque une alternative sensée, qu'il faut leur présenter (modèle de l'échelle).

Progression vers les notions-clés

Notre approche consiste à donner une description narrative, un récit ou narration, de la façon dont les idées évoluent, depuis les plus modestes jusqu'aux notions-clés identifiées au chapitre 3. Le récit détaille quelques-unes des idées qui se forment au cours de la progression, allant des petites idées vers les idées plus larges et plus abstraites qui permettent la compréhension des objets, des phénomènes et des relations dans le monde naturel (idées 1 à 10). Nous décrivons de la même manière la façon dont ces compréhensions s'accomplissent, c'est-à-dire les idées sur la science (idées 11 à 14).

Sous chaque intitulé d'une notion-clé, nous commençons par les idées contextuelles simples que les enfants sont capables de saisir à l'école primaire, à partir d'activités appropriées et avec le soutien du maître. Nous les faisons suivre par des idées que les élèves du collège peuvent développer, puisqu'ils ont une aptitude croissante à la pensée abstraite et qu'ils peuvent alors percevoir le rapport entre des événements ou entre des observations. Lorsque l'exploration du monde naturel se prolonge au lycée, la poursuite de cette création de liens et de relations rend les élèves capables de comprendre des modèles qui peuvent alors servir à donner sens à un ensemble encore plus étendu d'expériences présentes ou passées.

La barre verticale en marge du texte fait correspondre chaque ensemble d'idées avec la période scolaire

qui le concerne. En raison de la très grande diversité des dénominations des étapes de la scolarité de par le monde, nous indiquons plutôt des tranches d'âge, mais en utilisant délibérément des intervalles qui se chevauchent, dans la mesure où nous ne voulons pas et ne saurions pas imposer des frontières strictes pour délimiter ce qui convient à chaque âge. Les idées développées dans chaque étape doivent être vues comme des contributions à un développement continu. À chaque étape, l'objectif consiste à avancer un petit peu vers une notion-clé, et non à forger de force un lien entre chaque activité et la forme la plus sophistiquée de la notion. La capacité des élèves à avancer plus loin dans cette direction, à tout moment, dépend d'un certain nombre de variables locales, dont la moindre n'est pas la méthode pédagogique utilisée, comme indiqué au chapitre 5.

1. Toute la matière du monde est constituée de particules de taille minuscule.

Les atomes sont les constituants élémentaires de toute matière vivante ou non vivante. Le comportement des atomes, souvent organisés en molécules, explique les propriétés des différentes sortes de matière. Les réactions chimiques correspondent à des réarrangements des atomes entre substances pour en former de nouvelles. Chaque atome possède un noyau contenant des neutrons et des protons, entourés d'électrons. Les charges électriques opposées des protons et des électrons

s'attirent mutuellement, donnant aux atomes leur stabilité et permettant la formation de molécules et de substances variées.

5-7

On appelle *matière* toutes les « choses » rencontrées dans la vie quotidienne, y compris l'eau, l'air ou les différentes espèces de substances solides, parce qu'elles ont une masse et occupent de l'espace. Les différents matériaux sont reconnaissables à leurs propriétés, certaines d'entre elles servent à les classer en solides, en liquides ou en gaz.

7-11

Lorsque certains matériaux sont combinés, il arrive qu'ils forment un nouveau matériau, dont les propriétés diffèrent de celles du matériau original ; d'autres matériaux se mélangent simplement sans changement permanent et peuvent être à nouveau séparés. Les matériaux peuvent également être transformés par chauffage ou par refroidissement. La quantité de matière ne change pas lorsqu'un solide fond ou qu'un liquide s'évapore.

11-14

Si un matériau pouvait être divisé en morceaux de plus en plus petits, on trouverait que ceux-ci sont faits de particules de taille si petite qu'elles ne peuvent pas même être vues avec un microscope. Ces particules ne sont pas contenues dans le matériau,

elles *sont* le matériau. Toutes les particules d'un matériau donné et homogène sont identiques et elles diffèrent généralement de celles d'un autre matériau. Ces particules ne sont pas immobiles, mais se déplacent au hasard dans des directions variées au sein du matériau. La vitesse à laquelle elles se déplacent se traduit par la température du matériau. Ces particules peuvent s'attirer ou se repousser les unes les autres. La différence entre solide, liquide et gaz peut s'expliquer selon cette séparation plus ou moins grande et par la force de l'attraction entre particules voisines. Plus cette force d'attraction entre particules est intense, plus il faut d'énergie pour les séparer, par exemple en passant de la forme solide à la forme liquide ou d'un liquide à un gaz. Cela explique pourquoi les matériaux ont différents points de fusion et d'ébullition.

Le plus petit morceau d'un matériau est appelé *atome*. Où que ce soit dans l'Univers, toute matière vivante ou non vivante, est faite d'un très grand nombre de ces blocs de base, les atomes, dont il existe environ cent espèces différentes. Les substances faites d'une seule espèce d'atomes sont appelées «éléments chimiques». Les atomes de différents éléments peuvent être combinés pour former un très grand nombre de composés. Une réaction chimique implique le réarrangement des

11-14

atomes dans les substances réagissant entre elles pour former de nouvelles substances, tandis que la quantité totale de matière demeure la même. Les propriétés des différents matériaux peuvent être expliquées à partir du comportement et des propriétés des atomes, ou des groupes d'atomes, dont ils sont constitués.

14-17

Les atomes eux-mêmes possèdent une structure interne, formée d'un noyau comprenant des protons et des neutrons, entourés d'électrons. Les électrons et les protons possèdent une charge électrique – celle d'un électron étant dite négative et celle d'un proton positive. Les atomes sont neutres, ces charges se compensant exactement. Les électrons se déplacent rapidement dans la matière, formant des courants électriques et causant des forces magnétiques. L'effet global est une force d'attraction qui tient ensemble les atomes ou les molécules dans les corps. Lorsque certains électrons sont supprimés d'un atome ou s'y ajoutent, celui-ci possède alors une charge positive ou négative, et il est appelé « ion ».

Dans certains atomes, le noyau est instable et peut émettre une particule, processus appelé « radioactivité ». Ce processus conduit à l'émission de rayonnements et d'une quantité d'énergie bien supérieure à l'énergie échangée lors d'une réaction entre atomes.

2. Certains objets peuvent avoir un effet sur d'autres objets situés à distance des premiers.

Tous les objets agissent à distance sur d'autres objets, sans entrer en contact avec eux. Dans certains cas, comme pour le son et la lumière, l'effet résulte d'un rayonnement qui se déplace depuis la source jusqu'au récepteur. Dans d'autres, l'action à distance s'explique par l'existence d'un champ de force entre les objets, un champ magnétique ou un champ gravitationnel, par exemple. La gravitation est une force universelle d'attraction qui s'exerce entre tous les objets, des plus grands aux plus petits. Elle maintient les planètes en orbite autour du Soleil et elle cause la chute des objets qui nous entourent vers le centre de la Terre.

7-11

Certains objets peuvent agir sur d'autres objets même lorsqu'ils ne sont pas en contact avec eux. Par exemple, la lumière est perçue à la fois lorsqu'elle est émise par des sources proches, comme une ampoule électrique ou une flamme, ou par des sources éloignées comme le Soleil et les étoiles. Cela tient à ce que ces objets produisent tous de la lumière qui, à partir d'eux, voyage dans des directions différentes et qui est détectée lorsqu'elle atteint l'œil et y pénètre. Les choses que l'on voit soit produisent, soit réfléchissent de la lumière, que l'œil humain peut alors détecter. Le son est produit par des objets qui vibrent et il peut être détecté loin de sa source parce que celle-ci

7-11

créée des vibrations de l'air ou d'autres matières qui l'entourent. Nous entendons des sons lorsque les vibrations produites dans l'air parviennent à nos oreilles. Il existe d'autres exemples de cette action à distance, sans contact entre objets : la force de gravitation, qui provoque la chute des corps vers la Terre, ou les forces entre aimants ou entre corps électriquement chargés.

11-14

La gravité est une force d'attraction universelle entre tous les objets, qu'ils soient grands ou petits, même si elle ne devient apparente que lorsque l'un des objets est très grand. Cette attraction gravitationnelle maintient les planètes en orbite autour du Soleil, la Lune autour de la Terre et les autres lunes autour des autres planètes. Sur Terre, elle est facilement observable : elle tire tous les objets vers le bas, en direction du centre de la Terre. Cette attraction vers le bas est appelée le « poids d'un objet ». L'objet attire la Terre autant que la Terre l'attire, mais, la masse de la Terre étant bien supérieure, nous observons le mouvement induit de l'objet et non celui de la Terre. L'effet de la gravité est moindre sur la Lune que sur la Terre, parce que la masse de la Lune est inférieure à celle de la Terre : une personne sur la Lune pèse moins lourd que sur la Terre, bien que sa masse demeure la même. L'attraction de la Terre sur la Lune maintient

celle-ci en orbite, tandis que l'attraction de la Lune sur la Terre crée le phénomène des marées.

La lumière visible est un exemple de rayonnement qui se répand dans l'espace d'une façon qui ressemble à la manière dont les vagues se répandent à la surface de l'eau. D'autres sortes de rayonnements lumineux ne sont pas visibles pour l'œil humain, comme les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, l'ultraviolet, les rayonnements X et gamma, qui diffèrent les uns des autres par leur longueur d'onde. Ces lumières peuvent voyager dans l'espace vide. Concevoir les rayonnements comme des ondes aide à comprendre la façon dont ils se comportent. Mais bien que le son se répande lui aussi comme une onde, il ne peut pas voyager dans l'espace vide; il faut qu'il y ait de la matière présente de façon continue entre la source du son et le récepteur pour que les vibrations se propagent.

Quand un rayonnement frappe un objet, il peut être réfléchi par celui-ci, absorbé ou diffusé par lui, il peut le traverser, ou encore une combinaison de ces effets peut se produire. Lorsqu'il est réfléchi par un miroir ou transmis au travers d'un matériau complètement transparent, le rayonnement demeure le même, mais lorsqu'il est absorbé par un objet il est modifié, et cela cause généralement une augmentation de la température de l'objet.

Certains cas d'action à distance ne peuvent pas s'expliquer aisément en termes de rayonnement issu d'une source et se propageant jusqu'au récepteur. Un aimant, par exemple, attire ou repousse un autre aimant, et les deux aimants jouent un rôle équivalent. De même, l'attraction ou la répulsion entre des charges électriques sont réciproques. Le concept de « champ » est utile pour se représenter de telles situations : un champ est la région dans laquelle un objet exerce une influence, la force du champ décroissant en fonction de la distance à cet objet. Lorsqu'un autre objet pénètre ce champ, il subit un effet d'attraction ou de répulsion. La gravitation ainsi que les interactions électriques et magnétiques sont décrites en termes de champs.

3. Pour modifier le mouvement d'un objet, il faut qu'une force agisse sur lui.

La force exercée sur un objet n'est pas directement visible, mais elle est décelable grâce à son effet sur le mouvement ou sur la forme de l'objet. Lorsqu'un objet est immobile, les forces qui agissent sur lui sont égales en intensité et opposées en direction, s'équilibrant entre elles. La gravitation affectant tous les objets sur la Terre, il existe toujours une force opposée à la gravité lorsqu'un objet est immobile. Le déséquilibre des forces modifie le mouvement de l'objet dans la direction de la force résultant de leur combinaison. Lorsque les forces opposées agissant sur un

objet ne sont pas alignées, elles provoquent la rotation ou la torsion de l'objet. Cet effet est utilisé dans des machines simples.

5-7

Les forces peuvent pousser, tirer ou tordre les objets, changer leur forme ou leur mouvement. Chaque force agit dans une direction particulière. Des forces égales et alignées dans des directions opposées s'annulent et sont dites « en équilibre ». Le mouvement d'un objet est modifié si les forces agissant sur lui ne sont plus en équilibre.

7-11

On appelle « vitesse » d'un objet en mouvement la mesure de la distance qu'il parcourt en un temps donné. La rapidité avec laquelle le mouvement d'un objet est modifié dépend de la force qui agit sur lui et de sa masse. Plus grande est sa masse, plus faibles seront son accélération ou son ralentissement, à force égale appliquée : c'est une propriété de la masse qu'on appelle l'« inertie ».

11-14

Sur la terre, tous les objets sont affectés par l'attraction gravitationnelle. Un objet demeurant au repos à la surface de la Terre subit une ou plusieurs forces qui contrebalancent la force de gravité. Un livre posé sur une table ne tombe pas parce que les atomes de la table le poussent vers le haut avec une force égale à la force de gravité dirigée vers le

11-14

bas. Si un objet flotte dans un liquide ou dans l'air, c'est qu'une force dirigée vers le haut équilibre la force de la gravité. Cette force ascendante est égale au poids du fluide déplacé, et des objets lourds peuvent flotter s'ils sont évidés et qu'ils déplacent un grand volume et donc un grand poids d'eau.

14-17

Lorsque les forces qui agissent sur un objet ne sont pas égales et opposées en direction, l'effet de la force résultante est de modifier le mouvement de l'objet, de l'accélérer ou de le ralentir. Symétriquement, le mouvement d'un objet ne change que lorsqu'une force résultante agit sur lui. Souvent, cette force agissante n'est pas reconnue comme telle : un objet en mouvement, par exemple une bille qui roule, est supposé ralentir automatiquement. En fait, son mouvement est progressivement ralenti par la force de frottement entre l'objet et son environnement. Dans tous les cas, un changement du mouvement est causé par un déséquilibre des forces. Si aucune force résultante ne s'applique, le mouvement ne change pas : l'objet demeure immobile ou, s'il est en mouvement, poursuit celui-ci pour toujours en ligne droite, comme le font les étoiles dans le ciel. Le changement du mouvement se fait dans la direction de la force résultante ; le mouvement dans une direction perpendiculaire à cette force n'est pas affecté. Les satellites demeurent

en orbite autour de la Terre parce qu'ils ont été lancés depuis celle-ci par un moteur exerçant une force suffisante pour qu'ils atteignent une altitude où leur mouvement se poursuit sans moteur selon une courbe autour de la Terre. Cette courbe résulte de la seule force de gravitation agissant alors sur eux – il n'existe pas de résistance de l'air pour les ralentir –, force dont la direction change constamment.

Lorsque des forces opposées agissent sur un objet solide et ne sont pas de même direction, elles mettent l'objet en rotation ou le tordent. L'effet d'une telle force dépend de sa distance à l'axe autour duquel l'objet peut tourner. Plus on s'éloigne de l'axe de rotation, moins la force nécessaire est grande, mais elle doit parcourir plus de distance. Ce phénomène possède un grand nombre d'applications dans le monde des outils et des machines, où une force faible agissant à grande distance est convertie en force plus grande agissant à plus courte distance.

La pression mesure l'impact d'une force sur une surface donnée. Une force exerce moins de pression lorsqu'elle est répartie sur une grande superficie que lorsqu'elle est répartie sur une plus petite surface, une propriété qui a beaucoup d'applications, depuis le ski jusqu'à la pointe d'un stylo à bille. La pression dans un fluide (liquide ou gazeux) à un point

14-17

précis dépend du poids du fluide au-dessus de ce point. Sur Terre, la pression atmosphérique diminue quand l'altitude augmente, tandis que la pression dans un liquide augmente avec la profondeur.

4. La quantité totale d'énergie présente dans l'Univers demeure toujours la même, mais elle est parfois transférée d'un mode de stockage à un autre au cours d'un événement.

Bien des processus ou des événements consistent en des changements au cours du temps, et cela requiert de l'énergie pour se produire. L'énergie peut être transférée d'un corps à un autre de bien des manières. Dans de tels processus, une partie de l'énergie est transformée en une forme moins facile à utiliser. L'énergie ne peut ni être créée ni être détruite. L'énergie des carburants fossiles, une fois libérée par la combustion en présence d'oxygène, se dégrade en une forme plus difficile à utiliser.

5-7

Il existe bien des façons par lesquelles des événements peuvent être provoqués ou des choses transformées. On peut modifier le mouvement d'un objet en le poussant ou en le tirant. Chauffer de la matière peut la transformer, comme dans la cuisson, dans la fusion de solides ou dans la transformation d'eau liquide en vapeur. L'électricité fait briller une ampoule. Le vent fait tourner l'hélice d'une éolienne.

7-11

Dans tous ces changements, l'énergie est transférée d'un objet, qui est une source d'énergie ou une ressource, à un autre. Les combustibles tels que le pétrole, le gaz, le charbon et le bois sont des ressources énergétiques. Certaines ressources sont renouvelables, comme celles que produisent le vent, les vagues, le Soleil et les marées, tandis que les ressources issues de la combustion des carburants fossiles dans l'oxygène sont non renouvelables.

11-14

Les objets possèdent de l'énergie, c'est-à-dire une capacité à modifier les autres choses, du fait de leur composition chimique (comme dans les combustibles et les batteries), de leur mouvement, de leur température, de leur position dans un champ de gravitation ou d'une autre nature, ou encore du fait de la compression ou de la distorsion d'un matériau élastique.

De l'énergie peut être emmagasinée en élevant un objet au-dessus du sol : lorsqu'il est lâché et tombe, cette énergie apparaît dans son mouvement et peut produire un changement. Lorsqu'un objet est chauffé, il possède davantage d'énergie que lorsqu'il est froid. Un objet plus chaud réchauffe son environnement immédiat ou les objets plus froids en contact avec lui, jusqu'à ce qu'ils atteignent la même température. La rapidité

11-14

de ce phénomène dépend de la nature des matériaux chauffés et de ceux qui les séparent (selon que ces matériaux sont isolants ou conducteurs). Les composants chimiques contenus dans une batterie stockent de l'énergie qui est libérée lorsque la batterie est connectée à un circuit, si bien qu'un courant électrique y circule, transportant l'énergie aux autres composants du circuit et à son entourage. L'énergie peut être transportée par le rayonnement, comme le son dans l'air ou la lumière dans l'air et dans le vide.

Bien des processus et des phénomènes sont expliqués en termes d'échanges d'énergie, depuis la croissance des plantes jusqu'au temps qu'il fait. Le transfert d'énergie qui provoque tel ou tel résultat produit également et presque toujours une chaleur qui n'est pas recherchée, et qui va se dissiper par conduction ou par rayonnement. La chaleur correspond à un mouvement aléatoire microscopique des atomes et des molécules ; l'énergie sous cette forme ne peut pas être aussi facilement utilisée que sous d'autres formes. Une partie de l'énergie est par conséquent considérée comme perdue.

14-17

L'énergie ne peut ni être créée ni être détruite. Lorsque de l'énergie est transférée d'un objet à d'autres, la quantité totale d'énergie dans l'Univers demeure la même : la quantité que perd un objet

est la même que celle que gagnent les autres objets. Quand le Soleil chauffe la Terre, il perd progressivement de l'énergie par la lumière qu'il émet. La masse des atomes représente une forme d'énergie stockée, appelée « énergie nucléaire ». Les atomes radioactifs peuvent libérer cette énergie et la rendre disponible sous forme de chaleur.

Dans le monde entier, les besoins en énergie augmentent parce que, d'une part, la population humaine s'accroît et que, d'autre part, le mode de vie contemporain demande plus d'énergie, particulièrement sous la forme commode de l'énergie électrique. Puisque les combustibles fossiles, fréquemment utilisés dans les transports, les centrales électriques et les générateurs, sont une ressource limitée et qu'ils contribuent au changement climatique, on étudie d'autres façons de produire l'électricité, tout en cherchant à en réduire la demande par l'amélioration de l'efficacité des processus par lesquels nous utilisons l'énergie.

5. La composition de la Terre et de son atmosphère détermine sa surface et son climat.

La surface de la Terre s'échauffe sous le rayonnement solaire, ce qui provoque des courants de convection dans l'air et dans les océans et crée ainsi les climats. Sous la surface, la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre produit des mouvements dans les roches fondues. La surface

solide change constamment par le jeu de la formation et de l'érosion des roches.

5-7

7-11

La surface de la Terre baigne dans l'air, mais plus on s'élève au-dessus d'elle, moins il y a d'air. Le temps qu'il fait est déterminé par les conditions et les mouvements de l'air. La température, la pression, la direction et la vitesse du mouvement de l'air, la quantité de vapeur d'eau qu'il contient se combinent pour produire le temps qu'il fait. La mesure de ces différentes propriétés jour après jour permet de découvrir des structures qui peuvent être alors utilisées pour prévoir la probabilité de différents types de temps à court terme. Les structures à long terme du temps qu'il fait dans les différentes régions du monde sont appelées le « climat ».

La plus grande partie de la surface solide de la Terre est couverte de sol, lequel est un mélange de roches de tailles variées et de résidus d'organismes vivants. Un sol fertile contient également de l'air, de l'eau, certaines espèces chimiques résultant de la décomposition de la matière vivante, particulièrement de plantes, et certaines espèces vivantes telles que des insectes, des vers de terre et des bactéries. Le matériau solide qui se trouve sous le sol est rocheux. Il existe de nombreuses sortes de roches, à la composition variable et aux propriétés multiples. L'action du vent et de l'eau érode progressivement

7-11

les roches en morceaux de plus en plus petits – le sable est fait de petits morceaux de roche et l'argile de morceaux plus minuscules encore. Les deux tiers environ de la surface terrestre sont couverts par l'eau des mers et des océans.

11-14

La couche d'air qui se trouve au-dessus de la surface terrestre est transparente à la plus grande partie des rayonnements provenant du Soleil, qui la traversent donc. Ce rayonnement, absorbé par la surface de la Terre, est sa source d'énergie externe. La désintégration radioactive des matériaux présents à l'intérieur de la Terre depuis sa formation est sa source d'énergie interne. Le rayonnement issu du Soleil fournit leur énergie aux plantes, lesquelles contiennent de la chlorophylle leur permettant de fabriquer du glucose grâce à la photosynthèse. Le rayonnement solaire absorbé par la Terre chauffe sa surface, qui émet alors un rayonnement de longueur d'onde plus grande (infrarouge), lequel ne peut passer au travers de l'atmosphère, est absorbé par elle et maintient la Terre chaude. Ce phénomène est appelé l'« effet de serre », en raison de sa similitude avec ce qui se produit dans une serre chauffée par le Soleil.

14-17

L'oxygène de l'atmosphère, produit par les plantes grâce à la photosynthèse, protège indirectement

la Terre du rayonnement solaire à courte longueur d'onde (ultraviolet), dangereux pour nombre d'organismes vivants. L'action du rayonnement ultraviolet sur l'oxygène présent dans la haute atmosphère fabrique de l'ozone, qui absorbe ce rayonnement dangereux. La température à la surface de la Terre résulte d'un équilibre délicat, qui peut être facilement bouleversé par l'augmentation de la présence d'autres gaz dans l'atmosphère. Les activités humaines produisent du dioxyde de carbone et du méthane, qui augmentent l'effet de serre, entraînant un réchauffement global et un changement de climat.

Sous la surface solide de la Terre se trouve une couche très chaude appelée le « manteau ». Le manteau est solide quand il est sous pression, mais il fond lorsque la pression diminue (on parle alors de « magma »). Là où la surface solide est fissurée, ou plus mince, le magma peut monter jusqu'à la surface, par exemple lors des éruptions volcaniques. La surface solide terrestre est constituée d'un certain nombre de plaques solides qui sont en mouvement les unes par rapport aux autres et sont déplacées par les mouvements du manteau. Lorsque ces plaques entrent en collision, des chaînes de montagnes se forment. Une ligne de faille court le long des plaques : le long de cette frontière, les tremblements de terre sont plus fréquents et l'activité

14-17

volcanique est plus intense. La surface de la Terre évolue lentement au cours du temps. Les montagnes subissent l'érosion sous l'action de la pluie et du vent, tandis que de nouveaux massifs se forment lorsque la surface solide est poussée vers le haut.

6. Le Système solaire représente une minuscule partie d'un Univers formé de milliards de galaxies.

Autour du Soleil tournent en orbite huit planètes et d'autres objets plus petits, l'ensemble formant le Système solaire. Le jour, la nuit et les saisons s'expliquent par l'orientation et la rotation de la Terre dans son mouvement autour du Soleil. Le Système solaire fait partie d'une galaxie d'étoiles, de gaz et de poussières, une parmi les milliards présentes dans l'Univers, à des distances considérables les unes des autres. Un grand nombre d'étoiles possèdent des planètes.

5-7

Il existe des régularités dans la position du Soleil observé à différents moments du jour et dans la forme apparente de la Lune d'une nuit à l'autre.

7-11

La Terre se déplace autour du Soleil, et le tour de son orbite complète dure une année. La Lune est en orbite autour de la Terre et met environ quatre semaines pour en faire le tour. Le Soleil, situé au centre du Système solaire, est le seul objet du

7-11

Système qui soit une source de lumière visible. La Lune réfléchit la lumière du Soleil, et, lorsqu'elle se déplace autour de la Terre, la partie illuminée par le Soleil se modifie, ce qui explique les changements apparents de la Lune. La Terre tourne sur elle-même autour d'un axe nord-sud, et cette rotation crée l'apparence d'une rotation du Soleil, de la Lune et des étoiles autour de la Terre. Cette rotation est également à l'origine du jour et de la nuit, lorsque différentes parties de la surface terrestre sont dirigées vers le Soleil ou à son opposé. L'axe de la Terre est incliné par rapport au plan de son orbite autour du Soleil, si bien que la longueur du jour varie selon la position d'un observateur à la surface de la Terre et le moment de l'année. Cette inclinaison de l'axe de la Terre est à l'origine des saisons.

11-14

La Terre est l'une des huit planètes de notre Système solaire, lesquelles, avec beaucoup d'autres corps plus petits, sont en orbite autour du Soleil sur des trajectoires approximativement circulaires. Situées à des distances différentes du Soleil, elles accomplissent un tour complet sur des durées différentes. Les distances entre ces corps sont considérables : Neptune est à 4,5 milliards de kilomètres du Soleil, trente fois plus loin que la Terre. Vues de la Terre, les planètes se déplacent par rapport aux

étoiles, qui paraissent fixes les unes par rapport aux autres. L'exploration du Système solaire est possible à courte distance de la Terre, à l'aide de robots ou par des équipages humains.

Il arrive qu'un bloc de roche de taille importante, en orbite autour du Soleil, se rapproche suffisamment de la Terre pour y tomber à cause de son attraction gravitationnelle. Le frottement de cette roche contre l'air de l'atmosphère la chauffe et la rend lumineuse : elle est alors perçue comme une étoile filante. Un météore est une roche entièrement consumée par son entrée dans l'atmosphère, mais, si des fragments atteignent la surface terrestre, on les appelle des « météorites ». Les autres mouvements de la plupart des objets contenus dans le Système solaire sont réguliers et parfaitement prévisibles. Les mêmes lois scientifiques, qui établissent de façon générale la manière dont les objets se comportent, s'appliquent à la Terre et au reste de l'Univers. L'exploration spatiale a montré que la surface des autres planètes a également changé depuis leur formation. La vie n'a (pour l'instant) pas été découverte en dehors de la Terre.

Notre Soleil est une étoile parmi beaucoup d'autres, qui composent l'Univers. Il est essentiellement composé d'hydrogène. La source de l'énergie

que le Soleil et toutes les étoiles dispensent par rayonnement réside dans les réactions nucléaires qui ont lieu dans leur noyau central. Notre Soleil est une étoile parmi des milliards qui, rassemblées, forment une galaxie appelée la « Voie lactée ». L'étoile la plus proche du Soleil est beaucoup plus éloignée que Neptune, la planète la plus lointaine du Système solaire. Les distances au sein des galaxies ou entre elles sont si considérables qu'on les mesure en années-lumière : la distance parcourue par la lumière en une année. Il existe des milliards de galaxies dans l'Univers, à des distances extraordinairement grandes les unes des autres, et toutes s'éloignent rapidement les unes des autres. Ce mouvement des galaxies indique que l'Univers est en expansion depuis un état passé appelé le « big bang », qui remonte à quelque 13,7 milliards d'années, vers un état futur largement indéterminé.

7. Les organismes vivants sont tous organisés à partir de cellules et ont une durée de vie limitée.

Tous les organismes vivants sont constitués d'une ou de plusieurs cellules. Les organismes multicellulaires possèdent des cellules différenciées selon leur fonction. Toutes les fonctions de base de la vie résultent de ce qui se produit à l'intérieur des cellules, dont l'ensemble constitue un organisme. La croissance résulte généralement de multiples divisions cellulaires.

5-7

Il existe une grande variété de « choses » vivantes, des organismes, comprenant les plantes et les animaux. Elles se distinguent des « choses » non vivantes par leur capacité à se déplacer, à se reproduire et à réagir à certains stimuli. Pour survivre, les organismes ont besoin d'eau, d'air, de nourriture, d'une méthode pour se débarrasser de leurs résidus et d'un environnement qui demeure à un niveau de température convenable. Bien que certains organismes ne paraissent pas actifs, tous accomplissent à un moment ou à un autre les processus vitaux.

7-11

11-14

Tous les organismes vivants sont faits d'au moins une cellule ou de plusieurs que l'on ne distingue qu'au microscope. Toutes les fonctions de base de la vie résultent de ce qui se produit à l'intérieur des cellules. Les cellules se divisent pour remplacer les cellules vieillissantes ou pour en produire de nouvelles, lors de la croissance et de la reproduction. Elles extraient de l'énergie de leur nourriture pour satisfaire à ces fonctions. Certains organismes sont multicellulaires. Certaines cellules appartenant à des organismes multicellulaires, outre qu'elles effectuent les fonctions de toutes les cellules, sont spécialisées : par exemple, les cellules des muscles, du sang ou des nerfs ont des fonctions spécifiques à l'intérieur de l'organisme.

11-14

Les cellules se rassemblent souvent en tissus, les tissus en organes et les organes en systèmes d'organes. Dans le corps humain, ces systèmes exercent les fonctions vitales de respiration, de digestion, d'élimination des déchets et de contrôle de la température. Le système circulatoire apporte à toutes les parties du corps ce qui est nécessaire aux cellules et le système urinaire élimine les résidus solubles. Les cellules souches, qui ne sont pas spécialisées et peuvent s'adapter à différentes fonctions, sont capables de réparer des tissus. Les cellules fonctionnent mieux dans certaines conditions. Les organismes unicellulaires et multicellulaires ont tous des mécanismes pour maintenir en particulier la température et l'acidité entre des limites qui leur permettent de subsister.

14-17

À l'intérieur des cellules, il existe de nombreuses molécules de différentes espèces, qui interagissent pour accomplir les fonctions de la cellule. Dans les organismes multicellulaires, les cellules communiquent entre elles en échangeant des substances afin de coordonner leur activité. La membrane qui entoure chaque cellule joue un rôle important en régulant ce qui peut entrer ou sortir d'une cellule. L'activité au sein des différents types de cellules est régulée par des enzymes. Les hormones, produites par des tissus et des organes spécialisés, régulent l'activité d'autres organes ou de tissus assurant le

fonctionnement global de l'organisme. Chez les humains, la plupart des hormones sont transportées par le sang. La maladie est souvent le résultat d'un mauvais fonctionnement des cellules. Bien des médicaments agissent donc en accélérant ou en ralentissant le mécanisme régulateur des enzymes ou des hormones. Le cerveau et la moelle épinière contribuent également à la régulation de l'activité cellulaire, en envoyant des messages *via* les cellules nerveuses, sous la forme d'un signal électrique qui voyage rapidement entre cellules.

Si on leur donne le support adéquat, les cellules d'un certain nombre d'organismes peuvent être cultivées *in vitro*, c'est-à-dire en dehors de l'organisme. Ces cultures de cellules sont utilisées par les chercheurs pour étudier leurs fonctions et ont des applications médicales telles que la fabrication de vaccins, le dépistage des drogues, ou la fécondation *in vitro*. La culture des tissus végétaux est fréquemment utilisée dans l'étude des plantes, la sylviculture et l'horticulture.

La plupart des cellules sont programmées pour un nombre limité de divisions. Les maladies, causées par des micro-organismes invasifs, de mauvaises conditions environnementales ou un défaut de programmation cellulaire, perturbent en général les fonctions de la cellule. Si ses cellules ne sont plus capables de se diviser, l'organisme meurt.

8. Pour subsister, les organismes vivants ont besoin d'énergie et de matière, pour lesquelles ils sont souvent en compétition en dépendance vis-à-vis d'autres organismes.

La nourriture fournit aux organismes matière et énergie, maintenant ainsi les fonctions de base de la vie et permettant la croissance. Certaines plantes et bactéries peuvent utiliser directement l'énergie du Soleil pour produire des molécules complexes. Les animaux se fournissent en énergie en dissociant les molécules complexes de leur nourriture et dépendent en fin de compte des plantes vertes pour ce faire. Dans un écosystème, il peut y avoir compétition pour l'énergie et la matière nécessaires à la vie et à la reproduction.

5-7

7-11

Tout ce qui est vivant a besoin d'énergie et de nourriture ainsi que, généralement, d'air, d'eau et de certaines conditions de température. Les plantes qui contiennent de la chlorophylle utilisent la lumière solaire pour fabriquer la nourriture dont elles ont besoin et pour stocker celle qu'elles n'utilisent pas immédiatement. Les animaux ont besoin de substances nutritives qu'ils transforment. Ils les obtiennent soit directement en se nourrissant de plantes (herbivores), soit indirectement en les tirant d'animaux (carnivores) qui eux-mêmes ont mangé des plantes ou d'autres animaux. Finalement, les animaux dépendent des plantes pour

7-11

leur survie. Les relations entre organismes vivants peuvent être représentées par des chaînes ou des réseaux alimentaires.

Certains animaux dépendent également des plantes à d'autres : notamment pour leur habitat et, dans le cas des êtres humains, pour l'habillement ou pour l'obtention des combustibles. Les plantes dépendent également des animaux selon différents modes. Par exemple, les plantes à fleurs peuvent dépendre des insectes pour leur pollinisation ou d'autres animaux pour disperser leurs graines.

11-14

Des organismes interdépendants vivant ensemble dans des conditions particulières d'environnement forment un écosystème. Dans un écosystème stable, il y a des producteurs de nourriture (plantes), des consommateurs (animaux) et des décomposeurs – les bactéries et les champignons se nourrissant des produits de décomposition et des organismes morts.

Les décomposeurs produisent des matériaux qui aident les plantes à croître, si bien que les molécules présentes dans les organismes sont constamment réutilisées. Simultanément, de l'énergie traverse l'écosystème. Lorsque de la nourriture est utilisée par les organismes pour maintenir la vie, une certaine énergie est dissipée sous forme de chaleur, mais elle est remplacée dans l'écosystème par de

11-14

l'énergie issue du Soleil et utilisée pour produire de la nourriture sous forme de plantes.

Dans tout écosystème, il y a compétition entre les espèces pour l'énergie et les matériaux dont elles ont besoin pour vivre. Cette compétition s'atténue ou disparaît dans un écosystème stable. La persistance d'un écosystème dépend de la disponibilité permanente de ces ressources dans l'environnement. Les espèces de plantes se sont adaptées afin d'obtenir l'eau, la lumière, les minéraux et l'espace dont elles ont besoin pour grandir et se reproduire dans des environnements particuliers caractérisés par leurs conditions climatiques, géologiques et hydrologiques. Si ces conditions varient, la population de plantes peut changer, ce qui peut entraîner une modification dans les populations animales.

14-17

L'activité humaine, qui contrôle la croissance de certaines plantes et de certains animaux, modifie l'écosystème. La sylviculture, qui favorise la croissance de certains arbres plutôt que d'autres, supprime les végétaux qui alimentent certains animaux et réduit par conséquent la diversité des espèces qui dépendent de ces végétaux, et celle des animaux qui les suivent dans la chaîne alimentaire. L'agriculture moderne est conçue de telle sorte qu'elle réduit la biodiversité, en créant des conditions adaptées à des animaux et à des végétaux particuliers, afin de nourrir la population

14-17

humaine. L'utilisation répandue des pesticides afin de protéger un type de culture a de larges effets sur les insectes pollinisateurs dont dépendent beaucoup d'autres plantes. Ces activités humaines créent un écosystème simplifié et artificiel qui limite la biodiversité et entraîne la disparition de paysages et d'une vie sauvage culturellement précieuse.

9. L'information génétique est transmise d'une génération d'organismes vivants à la suivante.

L'information génétique au sein d'une cellule est contenue dans la molécule d'ADN sous forme d'un code à quatre lettres. Les gènes déterminent le développement et la structure des organismes. Dans la reproduction asexuée, tous les gènes du descendant viennent d'un parent unique. Dans la reproduction sexuée, chaque parent apporte la moitié des gènes.

5-7

7-11

Les « choses » vivantes produisent une descendance de même espèce, mais dans bien des cas, tous les descendants ne sont pas identiques aux parents, ni entre eux. Les plantes et les animaux, humains inclus, ont cependant nombre de caractères ressemblant à ceux de leurs parents parce que l'information est transmise d'une génération à la suivante. Mais certaines caractéristiques, telles que les compétences ou le comportement, ne sont pas transmises de la même façon et doivent être apprises.

Dans le noyau des cellules animales et végétales se trouvent des structures appelées « chromosomes », qui contiennent de grosses molécules complexes, l'ADN (Acide désoxyribonucléique). Lorsque les cellules se divisent, l'information nécessaire pour élaborer de nouvelles cellules se présente sous la forme d'un code lié à la manière dont les éléments de la molécule d'ADN sont assemblés. Un gène est un morceau de cet ADN, d'une certaine longueur, et des centaines ou des milliers de gènes sont présents sur un seul chromosome. Dans le corps humain, la plupart des cellules contiennent vingt-trois paires de chromosomes pour un total d'environ vingt mille gènes. Ceux-ci contiennent et fournissent l'information nécessaire à la croissance des cellules et à leur reproduction.

Lorsqu'une cellule se divise, dans le processus de croissance ou de remplacement de cellules mortes, cette information génétique est recopiée, si bien que chaque nouvelle cellule contient une réplique de la cellule parente. Parfois, une erreur se produit dans la réplication et cause alors une mutation, qui peut ou non conduire à un dommage pour l'organisme. Des changements dans les gènes peuvent résulter des conditions liées à l'environnement, telles que les rayonnements ou les produits chimiques. Ces modifications affectent l'individu mais n'affectent sa descendance que lorsqu'ils se

11-14

produisent dans les cellules sexuelles (sperme ou ovule).

Dans la reproduction sexuée, une cellule de sperme issue d'un mâle s'unit à une cellule ovule issue d'une femelle. Les cellules de sperme et les ovules sont des cellules spécialisées, chacune d'entre elles possédant soit le gène paternel, soit le gène maternel, cette répartition étant faite au hasard. Lorsqu'une cellule de sperme et un ovule se combinent, la moitié du matériau génétique contenu dans l'œuf fertilisé est issue de la cellule de sperme et la moitié de la cellule ovule. Lorsque l'œuf fertilisé se divise de façon répétée, ce matériau génétique est alors dupliqué dans chaque nouvelle cellule. Le tirage au sort et la recombinaison du matériau génétique, lorsque les ovules et les cellules de sperme se forment puis se combinent, produisent une immense variété de combinaisons possibles de gènes, et donc des différences qui peuvent être transmises d'une génération à la suivante. Cela fournit les éléments d'une sélection naturelle, laquelle résulte de variations rendant certains organismes mieux adaptés à certaines conditions d'environnement.

11-14

La reproduction asexuée, qui se produit naturellement dans une grande variété d'organismes depuis les bactéries et les insectes jusqu'aux

plantes, conduit à des populations possédant un matériau génétique identique. Les biotechnologies ont rendu possible la production d'organismes génétiquement identiques par le clonage artificiel dans un certain nombre d'espèces, incluant des mammifères.

La séquence entière des gènes d'un organisme s'appelle son « génome ». La recherche accroît sans cesse les connaissances sur l'information génétique en traçant la carte des génomes de différentes espèces d'organismes. Lorsque les séquences de gènes sont connues, le matériau génétique peut être artificiellement transformé pour donner certaines caractéristiques à un organisme. Dans la thérapie génique, des techniques particulières sont utilisées pour fournir à des cellules humaines certains gènes susceptibles de guérir des maladies.

10. La diversité des espèces, vivantes ou éteintes, est le résultat d'une évolution.

Toute vie aujourd'hui sur Terre descend directement d'un ancêtre commun universel qui était un organisme simple à cellule unique. Des modifications génétiques, survenues au cours d'un grand nombre de générations successives, ont abouti à la biodiversité. Les organismes incapables de s'adapter suffisamment aux changements de leur environnement ont disparu.

5-7

Il existe aujourd'hui un grand nombre d'espèces différentes de plantes et d'animaux. Beaucoup d'espèces ont vécu autrefois mais ont maintenant disparu. Nous les connaissons grâce aux fossiles. Les animaux et les plantes sont classés en groupes et en sous-groupes selon leurs ressemblances. Par exemple, au sein du groupe d'animaux appelés «oiseaux», il existe des familles, comme les mésanges et, à l'intérieur d'une famille, différentes espèces, comme les mésanges bleues, les mésanges à longue queue, etc. Les organismes appartenant à la même espèce ont une descendance de la même espèce. En général, des espèces différentes ne sont pas fécondes entre elles, ou alors leur descendance n'est pas féconde. Bien que les organismes d'une même espèce soient très semblables, ils diffèrent néanmoins légèrement. Dans la reproduction sexuée, la progéniture ne ressemble jamais exactement à ses parents.

7-11

11-14

Les espèces se trouvent dans un certain environnement parce que leurs caractéristiques les rendent capables d'y survivre. Cette adaptation à tel environnement est une conséquence des petites différences qui se produisent pendant la reproduction et qui conduisent certains individus à être mieux bien adaptés à cet environnement que d'autres. Dans la compétition pour les matériaux, la nourriture et l'énergie, ceux qui sont les mieux adaptés survivront

11-14

mieux et pourront transmettre leurs caractères adaptés à leur descendance. Ceux qui sont moins bien adaptés à un environnement particulier ont plus de risques de mourir avant de se reproduire, si bien que les générations à venir contiendront un plus grand nombre d'individus mieux adaptés. Cela ne se produit que si les changements résultent de mutations dans les cellules reproductives. Les mutations se produisant dans les autres cellules ne sont pas transmises. Au fil du temps, les mutations accumulées peuvent mener les individus survivants à former une nouvelle espèce.

La sélection naturelle des organismes présentant des caractéristiques adaptées à la survie dans des conditions particulières d'environnement se produit depuis que les premières formes de vie sont apparues sur Terre, il y a environ 3,5 milliards d'années au moins. Des organismes simples monocellulaires sont apparus tôt dans l'histoire de la vie. Il y a environ deux milliards d'années, certains d'entre eux évoluèrent en organismes pluricellulaires, desquels sont issus les animaux de grande taille, les plantes et les champignons d'aujourd'hui. D'autres formes de vie sont demeurées unicellulaires.

14-17

Lorsque des changements climatiques, géologiques ou de population se produisent, le bénéfice apporté par certains traits hérités peut être accru

ou diminué. Le processus d'adaptation, qui a lieu naturellement et très lentement, est accéléré par l'intervention humaine à travers la sélection et l'élevage d'animaux et de plantes dont les caractères sont satisfaisants pour des fonctions ou des environnements précis.

L'activité humaine modifie l'environnement plus rapidement que les organismes ne peuvent y répondre par l'adaptation. La pollution de l'eau, de l'air et du sol ainsi que l'agriculture intensive ont des effets d'une portée considérable sur l'environnement : elles ont déjà provoqué des changements dommageables à bien des organismes. Le taux actuel d'extinction des espèces causée par l'activité des hommes est des centaines de fois supérieur à ce qu'il serait en leur absence. Une réduction dans la diversité du vivant conduit à une dégradation significative des écosystèmes et à une perte de leur capacité à répondre à des changements de l'environnement.

L'évolution de la vie sur Terre n'est qu'un aspect limité de ce qu'on appelle « l'évolution cosmique ». Ce terme fait référence aux changements, progressifs, des propriétés physiques et chimiques des galaxies, comme l'apparition de l'atome de carbone, qui a fourni les conditions favorables à l'existence de la vie, sur la Terre tout au moins.

11. La science recherche la cause ou les causes des phénomènes du monde naturel.

La science veut expliquer et comprendre les phénomènes du monde naturel. Il n'existe pas une méthode scientifique unique pour atteindre ce but. La diversité des phénomènes naturels exige une grande diversité de méthodes et d'instruments pour produire les explications scientifiques et tester leur validité. Une explication énonce souvent les facteurs nécessaires pour qu'un événement se produise, comme le montrent les évidences issues de l'observation et de l'expérimentation. Dans d'autres cas, l'identification de la cause est fondée sur les corrélations révélées par l'observation systématique de structures répétitives.

7-11

La science consiste à trouver des explications aux phénomènes qui se produisent, ou à la façon dont ils se produisent, en supposant que chaque effet possède une ou plusieurs causes dans la nature et que nous pouvons attribuer une raison à ce qui se produit. Une explication n'est pas une hypothèse mais doit résulter d'un raisonnement. Il existe bien des façons de découvrir ce qui est la cause des phénomènes ou de leur occurrence. L'observation attentive, associant des mesures quand cela est réalisable, suggère une explication possible. Dans d'autres cas, il est possible d'intervenir par une expérience afin de provoquer un changement et d'observer ce qui

7-11

se produit. Quand on procède ainsi, il est important de vérifier que l'on ne change qu'une chose (variable, facteur ou paramètre) à la fois, de sorte que la conclusion puisse n'être attribuée qu'à cette chose-là.

11-14

Les observations soigneuses et systématiques ainsi qu'une description précise de ce qui est observé sont le fondement même de l'investigation scientifique. Il est important de réaliser que s'attendre à un certain résultat peut parfois influencer l'observation. Il est donc de bonne pratique que les observations soient faites indépendamment par plusieurs personnes et que les résultats soient présentés de façon claire, afin que d'autres puissent les vérifier.

Il peut exister des idées différentes sur l'explication de tel fait, de sorte qu'il faut rassembler des évidences pour décider quelle est celle qui est la plus adéquate. Une explication possible (hypothèse) propose le ou les facteurs que l'on pense capables d'expliquer un phénomène. Pour tester la validité d'une hypothèse, il est d'usage de prédire ce qui se produirait si tel facteur était changé, puis de conduire des observations et de regarder si le résultat constaté est en accord avec la prédiction. Si le résultat confirme la prédiction, et qu'aucun autre facteur ne conduit au même résultat, alors ce facteur

est accepté comme étant la meilleure explication dont on dispose pour expliquer le phénomène.

Quand les facteurs ne peuvent être manipulés expérimentalement – par exemple, le mouvement des planètes dans le Système solaire –, le phénomène est étudié grâce à l'observation systématique, en de nombreuses occasions, sur une longue durée. La recherche de structures ou de régularités dans les données est susceptible de révéler une corrélation entre plusieurs facteurs : chaque fois que tel facteur change, tel autre change également. La corrélation est également utile pour proposer un modèle sous-jacent, lequel sera à son tour employé pour formuler des prédictions, même s'il contient des aspects qui ne peuvent être directement observés ou modifiés. Néanmoins, une simple corrélation ne peut généralement pas être prise comme une évidence ferme permettant de conclure que tel facteur est la cause du changement, puisqu'un autre facteur encore non identifié peut être la cause des deux. Découvrir que tel facteur est la cause de tel effet ne suffit pas à fournir l'explication du mécanisme par lequel l'effet se produit. Pour y parvenir, un modèle des relations entre facteurs, fondées sur des principes scientifiques, est nécessaire.

Les phénomènes qui se sont produits dans le passé, tels que la formation du système solaire,

14-17

la métamorphose des roches ou l'évolution des espèces, peuvent également être soumis à ce processus de tests d'hypothèses. En de tels cas, c'est la cohérence des hypothèses avec tous les faits connus et les principes scientifiques acceptés qui les fait retenir comme sources de la meilleure explication possible.

12. Les explications scientifiques, les théories et les modèles acceptés constituent la meilleure représentation possible des faits connus à un moment donné.

Une théorie scientifique ou un modèle décrivant les relations entre des variables ou des composants d'un système doivent être en accord avec les observations disponibles à un moment donné et conduire à des prédictions pouvant être testées. Toute théorie, tout modèle est donc provisoire, susceptible de révision à la lumière de nouvelles données, même si précédemment il a pu conduire à des prévisions en accord avec les données alors disponibles. Chaque modèle possède ses points forts et ses limites lorsqu'il rend compte des observations.

5-7

Chacun peut poser des questions sur les objets et les phénomènes du monde naturel, et peut agir pour trouver des réponses qui l'aideront à comprendre ce qu'il observe.

7-11

La science fait ses découvertes et construit ses conclusions à l'aide d'une investigation systématique mettant en jeu la collecte de données par l'observation ou par la mesure de certaines caractéristiques des objets étudiés, ou encore à partir d'autres sources. Le fait de produire ou non une bonne explication dépend du genre de données qui ont été rassemblées, et le travail est habituellement facilité lorsqu'on dispose d'une théorie ou d'hypothèses sur ce qui pourrait se produire.

11-14

Pour faciliter ce processus d'explication des observations et de la cause des phénomènes, les scientifiques créent des modèles qui représentent ce qu'ils pensent observer. Il s'agit parfois de modèles physiques, comme une maquette du Système solaire, où différents objets sont utilisés pour représenter le Soleil, la Lune, la Terre et les autres planètes, ou la modélisation des atomes avec des boules et des tiges représentant leur arrangement dans un corps particulier. D'autres modèles sont théoriques, plus abstraits, comme la représentation de la lumière sous la forme d'une onde, et ces modèles représentent souvent les relations par des formules mathématiques. Les modèles engendrés dans un ordinateur donnent la possibilité de simuler les phénomènes et d'agir facilement sur les variables pour étudier leurs effets. Certains

11-14

modèles sont solidement établis dans des théories dont la justesse a été montrée sans qu'apparaisse jamais jusqu'ici de contradiction, quel que soit le contexte rencontré. D'autres sont plus provisoires et seront vraisemblablement modifiés à l'avenir. Il existe parfois plus d'un modèle possible, et il n'est pas toujours simple de choisir le plus efficace. Il y a d'autres cas où nous n'avons encore aucun modèle explicatif satisfaisant.

14-17

Les modèles scientifiques sont un moyen d'expliquer les phénomènes en termes de relations entre les parties d'un système. Ils sont conçus au cours d'un processus répété de comparaisons entre ce qu'ils prédisent et ce qu'on observe dans le monde réel. Le raisonnement basé sur les modèles va au-delà de ce qui peut être observé directement, tout en gardant un lien avec l'évidence qui en est issue, puisque les prédictions des modèles sont confrontées à ce qu'il est possible d'observer.

L'explication scientifique rend compte d'événements ou de phénomènes précis en termes de théorie ou de modèle. Les explications n'émergent pas de façon évidente à partir des données mais sont élaborées dans un processus qui met souvent en jeu l'intuition, l'imagination et des hypothèses raisonnées. Une théorie scientifique est une explication bien étayée d'un aspect du monde naturel,

basée sur un ensemble de faits confirmés de façon répétée par l'observation et l'expérience, et ainsi fermement établis.

Si de nouvelles données ne sont pas en accord avec les idées admises, alors il faut faire évoluer ces idées ou les remplacer par d'autres. Bien que l'on ait davantage confiance dans une théorie ou un modèle qui conduisent à des prédictions dont on constate de façon fiable et répétée l'accord avec les observations – et qui sont alors considérés comme des faits –, une explication ou une théorie ne peuvent jamais être démontrées comme étant parfaitement correctes, parce que la possibilité demeure toujours que de nouvelles données entrent en conflit avec elles. Si bien que certaines idées scientifiques acceptées aujourd'hui pour expliquer ce que nous observons diffèrent de celles qui étaient acceptées dans le passé, et certaines d'entre elles pourront à nouveau évoluer à l'avenir. Cela permet de distinguer les sciences de la nature, dont il est question dans ces pages, des mathématiques, où la démonstration est reine.

13. Les connaissances produites par la science sont utilisées dans les technologies afin de créer des produits servant des buts définis par l'homme.

L'application de notions scientifiques par les techniques a conduit à de profonds changements dans bien des

aspects de l'activité humaine. Les progrès des technologies permettent de nouvelles avancées scientifiques qui permettent à leur tour d'accroître les connaissances sur le monde naturel et de satisfaire la curiosité des hommes pour celui-ci. Dans certains domaines de l'activité humaine, les technologies précèdent les notions scientifiques, mais dans d'autres, et le plus souvent aujourd'hui ces notions précèdent les technologies.

5-7

La technologie contribue à fournir aux hommes des objets dont ils ont besoin et qu'ils peuvent utiliser, comme la nourriture, les outils, les vêtements, une habitation et des moyens de communication. Tout autour de nous, les exemples sont innombrables de la façon dont les matériaux ont été modifiés afin de servir certains buts.

7-11

Les technologies sont développées par l'ingénierie, qui implique l'étude des problèmes et le recours à des notions de science (parmi d'autres domaines) pour concevoir et développer la meilleure solution possible. Il existe toujours plusieurs manières d'aborder un problème, de nombreuses possibilités doivent donc être testées. Afin de décider quelle solution est la meilleure, il faut avoir une idée claire du résultat attendu et des critères de la réussite. Par exemple, la solution au problème « comment voir ce qui se passe derrière sa tête ? »

7-11

est différente si l'un des critères de réussite retenus est « avoir les mains libres ».

11-14

La conception d'une solution à un problème donné passe souvent par la réalisation d'un dessin ou d'une maquette. Les modélisations physiques, mathématiques ou numériques (par ordinateur) permettent de tester les modifications apportées aux formes ou aux matériaux, et d'améliorer la solution. Il faut souvent prendre en compte plusieurs facteurs pour optimiser une solution, tels que le coût, la disponibilité des matériaux et l'impact sur l'utilisateur et sur l'environnement, facteurs qui limitent éventuellement les choix.

14-17

La science, l'ingénierie et la technologie sont intimement entrelacées. L'application de la science à l'élaboration de nouveaux matériaux est un exemple de la façon dont la connaissance scientifique a conduit à des progrès dans les technologies et fourni aux ingénieurs un plus grand choix de réalisations possibles. Dans le même temps, les progrès technologiques ont contribué au développement scientifique en améliorant les instruments d'observation et de mesure, en rendant automatiques des processus jusque-là trop dangereux ou trop consommateurs de temps, tout particulièrement grâce à l'apport des ordinateurs. L'usage de la

technologie sert les progrès scientifiques, lesquels à leur tour peuvent être utilisés pour concevoir et réaliser des objets utilisables par les hommes. Dans le passé, les produits de la technologie ont souvent été conçus empiriquement, en devançant les concepts scientifiques, tandis qu'aujourd'hui, la compréhension par la science vient le plus souvent en premier, ou en même temps. L'application de principes scientifiques à la fabrication de nouveaux outils ou de nouvelles machines a rendu possible la production de masse, si bien que davantage d'hommes ont accès à tout un ensemble de produits utiles.

Les produits de la technologie présentent des inconvénients tout autant que des avantages. Même si l'utilisation de certains matériaux artificiels permet de réduire le recours à certains matériaux naturels rares, nombre de ces matériaux artificiels ne se dégradent pas comme le font les matériaux naturels. Il se présente donc un problème de déchets lorsqu'on les jette. D'autres produits de la technologie, tels que les téléphones mobiles et les ordinateurs, utilisent des métaux qui n'existent sur la Terre qu'en petites quantités et pourraient s'épuiser bientôt. De tels exemples reflètent un problème plus large : la nécessité de recycler les matériaux pour les économiser et pour réduire la pollution. Lorsqu'il existe de tels effets nocifs sur

14-17

l'environnement, ayant un impact sur la vie des hommes, les scientifiques et les ingénieurs doivent collaborer pour cerner le problème et lui trouver des solutions.

14. Les applications de la science ont, bien souvent, des implications éthiques, sociales, économiques et politiques.

L'usage des connaissances scientifiques par les technologies a rendu possibles de très nombreuses innovations. Décider du caractère souhaitable ou non de telle ou telle application particulière de la science ne relève pas du seul jugement scientifique. Des jugements éthiques et moraux peuvent alors intervenir, fondés par exemple sur des considérations de justice, d'équité, de protection de l'être humain ou d'impact sur la société et son environnement.

7-11

La compréhension que développe la science permet d'expliquer le fonctionnement et les phénomènes du monde naturel. Cette compréhension a souvent été appliquée pour aider à résoudre les problèmes de l'humanité. Si ces solutions technologiques ont amélioré la vie et la santé d'un grand nombre de personnes dans bien des pays lors des décennies écoulées, il faut bien reconnaître qu'elles utilisent parfois des matériaux naturels dont les réserves sont limitées ou qui détruisent l'environnement.

Les applications de la science ont de manière générale des conséquences positives et négatives. Certains aspects négatifs peuvent être anticipés, d'autres apparaissent au cours du temps. Une eau propre, une nourriture adaptée et de meilleurs médicaments ont accru l'espérance de vie humaine. Mais, simultanément, la croissance de la population a augmenté la demande portant sur les ressources et sur la superficie des terres, afin de produire davantage de nourriture, de construire des logements et de traiter les déchets. Cela a souvent eu des conséquences négatives dans les pays en développement, en détruisant les habitats d'autres êtres vivants ou en provoquant l'extinction de certaines espèces.

Il existe de nombreux exemples des conséquences inattendues du progrès technologique. Une facilité plus grande à se déplacer plus vite, particulièrement dans les airs, brûle du pétrole, ce qui produit du dioxyde de carbone, l'un des gaz qui réchauffent la surface de la Terre en accentuant l'effet de serre. Une augmentation même légère de la température terrestre a des effets considérables sur les glaces polaires, le niveau de la mer et la structure du climat. Dans tous ces cas où les effets nocifs sont connus, les avantages et les désavantages des applications de la science doivent être soigneusement mis en balance.

Toutes les innovations consomment des ressources d'une espèce ou d'une autre, y compris des ressources financières, si bien que des décisions doivent être prises lorsque plusieurs demandes sont en compétition. Ces décisions, qu'elles se prennent à un niveau gouvernemental, local ou individuel, doivent faire appel à une compréhension des concepts scientifiques et des principes technologiques qu'elles mettent en jeu. Mais les décisions sont également prises en fonction de valeurs ou de besoins rivaux, et non sur la seule foi de l'évidence scientifique. Ainsi, lorsqu'ils conçoivent un nouveau système ou un nouveau produit, les ingénieurs doivent prendre en compte des valeurs éthiques ainsi que des réalités politiques et économiques, tout autant que la science et la technologie.

La compréhension offerte par la science aide à saisir les conséquences de certaines de ses applications, mais la décision concernant le recours ou non à certaines actions s'appuie sur des jugements éthiques et moraux qui ne relèvent pas de la science. Il existe une différence importante entre le savoir donné par la science – au sujet, par exemple, de la nécessité de préserver la biodiversité, des causes du réchauffement climatique, des effets nocifs de certaines substances ou de certains modes de vie – et les mesures qui doivent ou non

être prises au regard de ces problèmes. Les opinions sur les décisions à prendre sont parfois très divergentes, mais les fondements scientifiques du débat ne peuvent pas être une question d'opinion.

5

ENSEIGNER AVEC LES NOTIONS-CLÉS POUR OBJECTIF

Depuis des années, on entend venir de partout des appels répétés à une définition plus profonde et moins étendue, moins désordonnée, des objectifs de l'éducation à la science. La publication de *10 notions-clés pour enseigner la science* prétendait relever ce défi en identifiant un nombre relativement restreint de notions pour la compréhension desquelles l'éducation devrait accompagner tous les élèves. Les retours que nous avons reçus, en provenance des nombreux pays où ce texte a été publié et utilisé, indiquaient que la description de ces notions n'appelait que des corrections et des modifications mineures.

En revanche, le besoin s'est exprimé d'un approfondissement de la pratique liée à cet enseignement et d'une discussion autour des implications pratiques du travail autour des notions-clés. En particulier, quelles

différences impliqueraient l'enseignement de ces notions-clés dans les décisions concernant les principaux éléments liés à l'apprentissage des élèves : concerneraient-elles le contenu des programmes, la pédagogie, l'évaluation ? Ce chapitre essaie de répondre à ces trois questions.

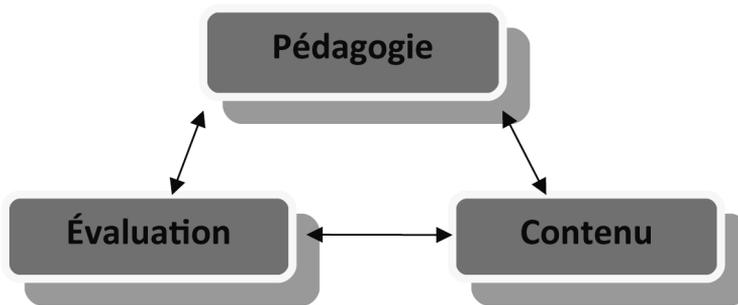


Schéma 1 – Interactions entre les expériences des élèves

Les trois aspects de ce que vivent les élèves, représentés dans le schéma 1, ne sont pas indépendants les uns des autres. Comme les flèches le soulignent, tout changement qui affecte l'un d'entre eux affecte aussi les autres. Ces interactions sont importantes : par exemple, il est inutile de suggérer que le contenu devrait se concentrer sur les notions-clés, si l'évaluation oblige à mémoriser des faits disparates ou si la pédagogie ne crée pas les liens nécessaires à la formation de ces notions-clés. Aucun intérêt non plus à promouvoir le recours à un enseignement basé sur l'investigation en présence d'un système autoritaire d'évaluation sommative

(tests extérieurs ou avis de l'enseignant) ou d'un programme au contenu débordant. On ne peut pas s'attendre non plus à ce que les élèves endossent la responsabilité de leur propre formation continue si l'enseignement ne leur laisse pas de temps pour la réflexion ni d'espace pour la créativité. Inutile enfin d'attendre une attitude positive envers la science si le contenu des programmes semble aux yeux des étudiants trop éloigné de leurs centres d'intérêt ou de leur propre expérience.

Des chances égales pour tous les élèves

Quand nous réfléchissons aux chances données à chacun d'apprendre, par l'intermédiaire du contenu d'un programme, d'une pédagogie et d'une évaluation, il est essentiel de garder à l'esprit le principe fondamental de l'équité (voir page 32). Tous les élèves ont besoin de cette chance pour se préparer à vivre dans le monde complexe d'aujourd'hui. La conviction que tous les élèves sont capables d'apprendre est étayée par la recherche, mais des disparités en termes de réussite, marquées et persistantes, sont observées dans de très nombreux pays, associées à des différences de sexe, de bagage culturel et de statut socio-économique. Parmi les nombreux facteurs reconnus pour rendre compte de ces disparités, les occasions d'apprendre, à l'école et en dehors, sont primordiales. Bien que les élèves apprennent de plus en plus en dehors du système scolaire,

qui n'est plus toujours la source principale du savoir, l'école demeure malgré tout l'atout principal pour un apprentissage structuré. Cependant, les élèves de familles ou de quartiers favorisés sont bien plus susceptibles d'arriver à l'école avec une bonne disposition pour l'enseignement de la science, de terminer leur cycle secondaire et de continuer leurs études ensuite, que les élèves défavorisés.

Les écoles accueillant une grande proportion d'élèves de milieux défavorisés sont certainement plus enclines à rattraper en priorité les lacunes des élèves en langue et en mathématiques, avant tout le reste, dont la science. De plus, elles sont souvent mal dotées en termes d'expertise pédagogique et de ressources pour enseigner la science. Par conséquent, les élèves n'y profitent pas des expériences précoces qui fondent le développement de la compréhension des idées et des pratiques scientifiques, ni des avantages qui en découlent.

Le fait d'identifier des problèmes suggère déjà des solutions. Les écoles ont besoin d'enseignants, de soutien, d'équipements, d'orientation, facteurs nécessaires pour assurer aux élèves de toutes les origines sociales des chances équitables d'apprendre. Les en doter impliquerait une réaffectation des ressources humaines et matérielles. Cela impliquerait aussi des conseils pour s'assurer que l'évaluation participe de l'apprentissage et que ses méthodes ne désavantagent pas les élèves ayant des difficultés à s'exprimer, ou dont la langue

maternelle, parlée à la maison, n'est pas la langue de l'école. Mais cela impliquerait aussi, de manière tout aussi importante, une façon de tourner la diversité des élèves à leur avantage, en accord avec les principes concernant le choix des activités (voir p 34), afin que les expériences quotidiennes et les idées que les élèves apportent à l'école soient la base de leur acquisition des idées scientifiques.

Contenu des programmes

Nous désignons par *contenu des programmes* le thème ou le sujet particulier étudiés qui servent de véhicules pour les élèves vers les idées, les compétences ou les attitudes visées par un programme d'études formel. Il existe tellement de paramètres dans, entre autres, le développement des notions de forces et de mouvement, de chaîne alimentaire ou des propriétés isolantes de différents matériaux qu'il faut bien trouver un moyen de choisir entre tous les sujets et toutes les activités possibles. Les principes exposés dans le chapitre 2 donnent des critères pour effectuer ce choix : les activités doivent promouvoir le plaisir de l'activité scientifique, encourager la curiosité, être perçues par les élèves comme intéressantes et pertinentes par rapport à leur vie et, bien sûr, développer le raisonnement, les capacités et les attitudes scientifiques. Le critère principal qui incite à identifier les notions-clés reste celui-ci : que les

élèves puissent appréhender la façon dont la science nous rend capables de comprendre le fonctionnement du monde.

Un contenu tiré du monde

Les enseignants reconnaissent instinctivement le besoin de capter l'attention de leurs étudiants et savent qu'ils réussiront mieux en choisissant un contenu en relation avec une expérience éventuellement hypothétique, mais réelle ou possible. Les maîtres des jeunes enfants sont experts pour inventer un scénario ou une situation imaginaire, qui serviront de point de départ à une investigation : fabriquer en classe une maquette de maison à partir d'une boîte à chaussures, comme contexte pour explorer les différents matériaux utilisés dans les constructions réelles, ou imaginer comment on peut se réchauffer au sommet d'une montagne venteuse pour tester ensuite les propriétés isolantes de différents tissus. Pour des élèves plus grands, le prétexte peut être complété dans l'expérience réelle par la visite de centrales électriques, de centres de retraitement des eaux usées, de centres de recyclage, etc. Non seulement de telles visites suscitent un intérêt pour la façon dont sont rendus ces services essentiels, mais elles donnent aux élèves l'occasion de voir comment la science est appliquée tout au long de ces processus.

Les sujets tirés du monde réel provoquent intérêt et motivation. La motivation est particulièrement

importante à une époque où les enfants ont un accès immédiat au divertissement non seulement à travers la télévision, mais aussi, à tout moment, grâce à leurs téléphones portables ou tablettes. Mais les faits et les phénomènes du monde sont en général trop complexes pour que les élèves soient capables de comprendre leur fonctionnement par l'interaction directe avec eux. Bien que l'utilisation de contextes réels ait beaucoup d'avantages, et que certains phénomènes doivent être étudiés *in situ* précisément en raison de leur complexité, elle peut aussi prêter à confusion. Le trop-plein de détails des faits réels masque les caractéristiques à identifier pour développer les idées qui conduiront vers un autre cadre de pensée.

Les étudiants ont besoin d'aide pour prêter attention aux paramètres critiques (par opposition aux paramètres négligeables) d'un problème complexe, et il ne faut jamais présumer qu'ils sont capables d'identifier par eux-mêmes les relations applicables sous-jacentes. C'est pourquoi, afin d'éviter la confusion inhérente au travail de terrain, nous transposons l'essence du problème dans la classe ou dans le laboratoire, où les idées seront plus directement testées et développées. Que le contexte qui éveille l'intérêt des élèves soit une histoire ou une visite, la science est apprise dans une version simplifiée de la réalité, en classe ou dans le laboratoire, où les conditions sont contrôlables et les variables mesurables.

Durant tout le processus, il est important de ne pas perdre le lien avec les choses du monde environnant. À moins que le lien crucial avec la situation « réelle » ne soit conservé, il existe un risque d'oublier la pertinence des activités qui se déroulent en classe. Il est donc nécessaire de chercher un équilibre entre la richesse et les exigences cognitives du trop-plein d'informations associé aux situations du monde réel, et l'étude d'aspects spécifiques et sélectionnés, qui aideront à établir les connexions entre différents faits et différents phénomènes. Il importe par conséquent d'assurer une discussion régulière sur la manière dont les découvertes faites au cours des investigations menées en classe se rapportent au contexte initial qui les a motivées. Le défi consistant à appliquer les idées émergentes à de nouvelles situations et à relier entre elles les idées qui les expliquent est très important pour le développement des notions-clés.

Susciter l'intérêt pour un contenu

Certains sujets sont mieux traités si on les approche par l'investigation tandis que d'autres sont mieux présentés sous la forme d'un compte-rendu d'une découverte scientifique ou d'une discussion autour d'expériences ou d'inventions d'intérêt local immédiat. Ces éléments devraient être pris en compte dans la sélection du contenu lié aux notions-clés. Il est important que les élèves aient l'occasion de discuter de la manière dont

les idées évoluent dans l'histoire de la science et des raisons de ces changements. Élargir ces débats aux investigations menées par l'élève lui permettra de réaliser le rôle des évidences qui s'imposent dans le processus de compréhension et d'avancer en direction des notions-clés sur la nature de la science et de ses applications. Il est possible d'aller encore plus loin en discutant de la manière dont les applications de la science ont conduit à des progrès en médecine, par exemple, ou dans le domaine des communications ou des déplacements. Ce genre de sujets suscite généralement l'intérêt des élèves et constitue des sources de motivation pour développer leurs idées au sujet des faits et des phénomènes du monde qui les entoure.

Progression dans l'approche du contenu

Il est possible d'étudier le même fait, le même habitat et le même phénomène à différents moments de la scolarité, tant que la manière dont le contenu est abordé prend en compte la progression des élèves au cours du temps dans le développement des idées adéquates. Comme nous l'avons dit au chapitre 4, le rythme de cette progression varie d'un élève à l'autre, en fonction de ses expériences passées, à l'école et en dehors. Vouloir donner une description précise de la progression, qui s'appliquerait à tous les élèves, serait donc irréaliste. Mais des tendances communes sont repérables et permettent une description large des attentes possibles

à différents points du parcours, à mesure que les élèves avancent de l'école maternelle à l'école primaire, puis dans le cycle secondaire :

- la conscience croissante que plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour expliquer les phénomènes ; une meilleure quantification des observations et le recours progressif aux mathématiques pour affiner les relations et approfondir la compréhension ;
- la capacité croissante à considérer que les propriétés découlent parfois de caractéristiques impossibles à observer directement ;
- l'emploi plus efficace de modélisations physiques, mentales et mathématiques.

La référence à l'usage croissant de la quantification des observations et à la modélisation des relations souligne le rôle important des mathématiques quand il s'agit de développer des notions de science par l'investigation. Les mathématiques aident les élèves à aller au-delà de la description verbale. La représentation graphique des données, en courbes et en tableaux, les aide à repérer les structures, à établir des connexions qui développent leur réflexion sur les associations entre variables et à formuler des hypothèses sur les causes à tester par l'expérience. L'analyse statistique des données les rend capables d'inférer des relations probables et de formuler des prédictions. La coordination entre l'enseignement des sciences et celui des mathématiques engendre ainsi des bénéfices mutuels : les outils

mathématiques aident la compréhension des sciences et, en même temps, l'utilisation de données tirées de l'investigation en sciences permet d'apprécier l'étendue de l'application de ces outils.

Pédagogie

Lorsqu'ils veulent saisir le sens d'une expérience nouvelle, que ce soit dans la classe ou en dehors, les élèves partent des idées qu'ils possèdent déjà, exactement comme les scientifiques lorsqu'ils essaient d'expliquer un phénomène et d'accroître leur compréhension de la façon dont les choses se comportent dans le monde qui les entoure. En science, la compréhension du monde naturel et du monde « fabriqué » se développe en recherchant des réponses aux questions, en collectant des données, en raisonnant et en passant au crible ce qui semble s'imposer (les évidences) à la lumière de ce qu'on a trouvé et de ce qu'on connaît déjà, en tirant des conclusions et en publiant les résultats. Les données peuvent provenir de la manipulation directe des matériaux, de l'observation des phénomènes ou de sources secondes, comme les livres, Internet, les médias ou d'autres personnes. L'interprétation des données, pour trouver des évidences et tester les hypothèses, peut passer par un débat avec les autres élèves et le professeur et par la révélation de ce que les experts ont conclu. Le principe implicite est que les élèves participent à des

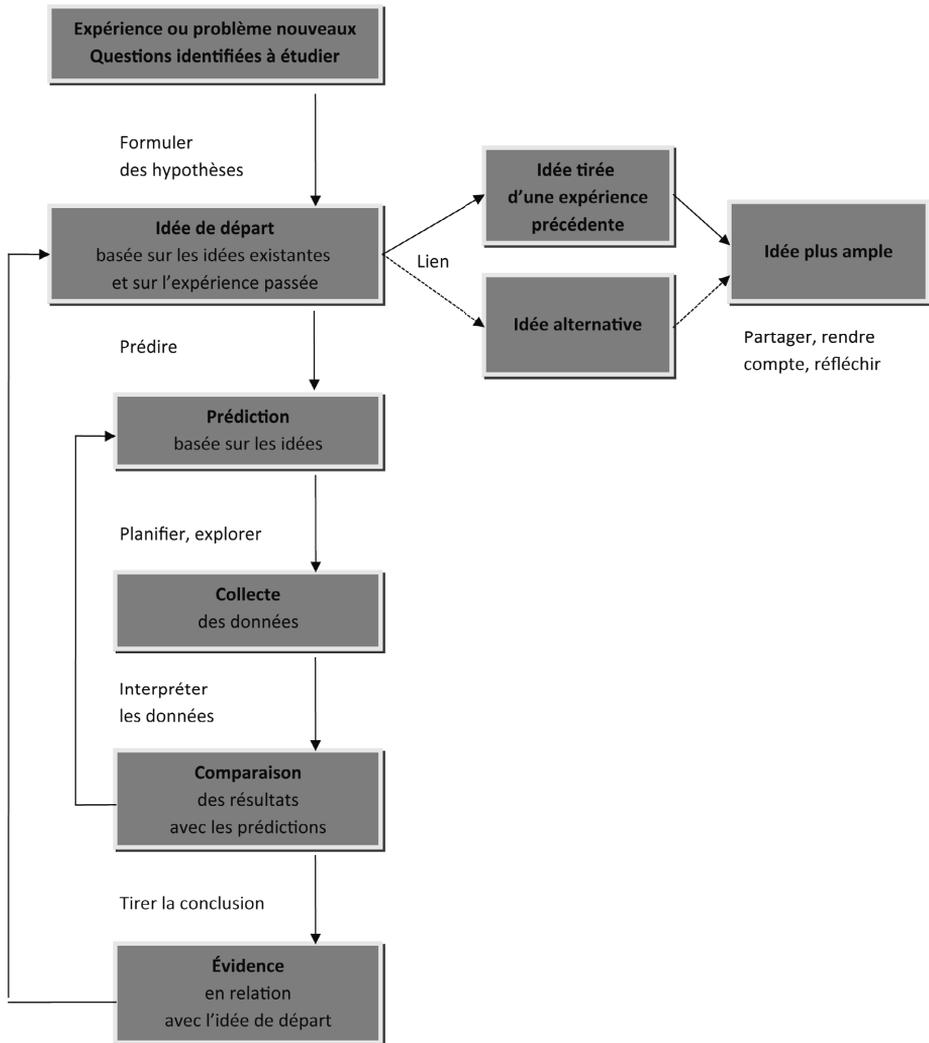
activités aussi similaires que possible à celles des scientifiques quand ils cherchent à comprendre. En prenant conscience de ces activités, les élèves développent leurs notions SUR la science.

Développer les notions grâce à l'investigation

Conçu comme tel, le processus de développement des notions-clés s'apparente à celui de l'investigation : utiliser l'investigation scientifique et les capacités propres aux scientifiques pour comprendre le monde. L'implication pratique de cette idée est représentée de façon simplifiée dans le schéma 2 (voir ci-contre).

L'investigation débute avec une nouvelle expérience qui soulève une question : comment l'expliquer ? L'exploration initiale de la nouvelle expérience révèle des caractéristiques en lien avec des idées existantes, qui peuvent conduire à une explication possible. Il peut exister plusieurs idées pertinentes fournissant des explications possibles (ou des hypothèses) à tester afin de savoir laquelle, si c'est l'une d'entre elles, donnera une réponse acceptable. Dans tous les cas, le test consiste à savoir s'il existe une affirmation suffisamment convaincante (évidence) pour fonder sur elle une prédiction. L'évidence est rassemblée en planifiant et en conduisant une investigation, ce qui implique la collecte et l'interprétation de nouvelles données, l'observation systématique ou la consultation de sources tierces, de seconde main. Il peut arriver que plusieurs

ENSEIGNER AVEC LES NOTIONS-CLÉS POUR OBJECTIF



L'apprentissage par l'investigation

hypothèses doivent être testées : la séquence prédiction/organisation/interprétation doit donc être répétée. La conclusion tirée des nouvelles données montre s'il existe une évidence (*evidence*) pour défendre l'explication possible ainsi que l'idée ou la notion sur laquelle celle-ci s'appuie. Si c'est le cas, l'idée devient « plus ample », parce qu'elle explique un plus grand ensemble de phénomènes. Et, même quand cela ne semble pas fonctionner et qu'il faut essayer une autre idée, l'expérience aura permis de préciser cette idée.

Il est important que les étudiants partagent avec les autres le parcours entier des activités et des raisonnements, afin que tous bénéficient de la discussion critique et tirent un savoir de ce qui ne fonctionne pas tout autant que de ce qui fonctionne.

Développer les capacités d'investigation

Le schéma précédent indique les actions requises pour passer d'une étape à la suivante. Les résultats de l'investigation dépendront de la façon dont ces actions seront menées, c'est-à-dire de la façon dont s'y prendront les élèves pour faire des prédictions, planifier une recherche pour les mettre à l'épreuve, interpréter les données et en tirer des conclusions. Pour le développement des idées scientifiques, la collecte et l'interprétation des données doivent être effectuées avec une rigueur scientifique. Sans quoi les idées seront peut-être acceptées mais pourront toujours être rejetées,

et les élèves conserveront leurs propres idées non scientifiques. Par conséquent, il est essentiel que la pédagogie aide les élèves à développer les capacités nécessaires à l'investigation scientifique, en accord avec les principes développés page 32. Il est plus facile d'y parvenir dans le contexte d'investigations qui conduisent à la compréhension du monde environnant, dans lequel les raisons de prendre certaines mesures sont bien visibles. La valeur de l'investigation dépasse donc la recherche de la réponse à une question précise. Elle contribue à la fois à la compréhension des notions-clés et au développement des capacités et des dispositions qui permettent l'apprentissage ultérieur, ainsi qu'à la confiance nécessaire pour questionner et chercher des réponses, apprendre en collaboration avec les autres et s'ouvrir à de nouvelles idées.

Présenter les idées alternatives

Les idées auxquelles recourent les élèves pour essayer d'expliquer les faits ne sont pas toujours, et sont même rarement, des idées qui résistent aux tests et « grandissent » en idées plus scientifiques. Le plus souvent, il faut proposer une idée alternative plus scientifique. Par exemple, les élèves peuvent tenter d'expliquer qu'un objet qui n'est pas une source lumineuse est cependant visible parce que leurs propres yeux dirigent un rayon lumineux sur lui. En testant cette idée (c'est-à-dire en essayant de voir l'objet dans le noir), on leur montre

que l'idée ne fournit pas une explication satisfaisante. Le rôle du professeur est alors très important : donner accès à des idées alternatives et fournir le moyen de les tester.

Les idées alternatives peuvent provenir des autres élèves, de sources d'informations extérieures ou du professeur lui-même, qui peut suggérer des analogies ou des liens avec des expériences auxquelles les élèves n'auraient pas pensé. Pour tester ces idées alternatives, qui ne viennent pas des élèves, il faut construire un échafaudage : donner des indications pour tester une idée sans se jeter sur elle comme si c'était « la bonne réponse ». En suggérant, par exemple « que se passerait-il si... ? », « supposez que... » ou « à quoi pourrait-on s'attendre si... ? ». Avec ce soutien, les élèves rassemblent des éléments d'évidence convaincants qui leur permettront de décider si cette idée, nouvelle pour eux, donne une explication satisfaisante. Si c'est le cas, alors l'idée qui leur a été présentée devient « plus ample », parce qu'elle explique plus de choses qu'auparavant et contribue au développement de la compréhension chez les élèves.

Investigation et travail pratique

La science basée sur l'investigation est parfois assimilée à la « mise en pratique » et aux « mains dans le cambouis ». Bien sûr, une grande part de l'investigation implique réellement de travailler avec des matériaux

et des appareils pour trouver l'évidence de ce qui se passe quand certains paramètres varient ou pour tester une théorie explicative quant à la cause de ce qui arrive. L'expérience directe permet aux élèves de voir par eux-mêmes si leurs idées et leurs explications fonctionnent. Cependant, les enseignants doivent se méfier des pseudo-investigations qui débordent d'activités pratiques – observations, mesures et notes – mais n'impliquent pas les élèves, et ne les invitent pas à tirer le sens des faits ou des phénomènes qui se produisent dans le monde naturel, ce qui arrive quand le professeur tire les conclusions à la place des élèves ou quand les élèves suivent des consignes précises sans se poser de questions sur ce qu'ils font. L'évaluation de l'enseignement, abordée dans le chapitre 6, peut aider à identifier la raison dans chaque cas particulier.

L'investigation en contexte

Comme nous l'avons noté dans le chapitre 3, l'investigation signifie que les élèves développent leur compréhension grâce à leurs propres investigations à propos de questions dont ils ignorent la réponse mais dont ils veulent trouver la réponse : des questions qu'ils se posent eux-mêmes ou que l'enseignant présente de telle manière qu'ils puissent se les approprier. Un petit nombre d'investigations où les élèves réfléchissent par eux-mêmes, en commençant par une question identifiée

comme importante à leurs yeux, sera plus fécond pour le développement des notions-clés qu'un grand nombre d'exercices de routine.

L'investigation ne sera pas la seule forme de pédagogie que les élèves rencontreront dans leur éducation à la science, car certains apprentissages nécessaires, comme l'utilisation des appareils, les noms, les conventions et les symboles, nécessitent un enseignement direct. De plus, durant le cycle secondaire (collège), on présente progressivement aux élèves des idées complexes et abstraites qui ne peuvent être élaborées par la seule investigation. En réalité, à chaque étape, l'investigation contribue à ce que l'expérience « fasse sens », sans être la seule approche utilisée. L'investigation permettra aux élèves de comprendre comment certaines idées expliquent les phénomènes, mais ne sera pas, en elle-même, la source de ces idées, dans la mesure où les idées n'émergent pas des observations par un simple processus d'induction. Par conséquent, l'habileté des enseignants à introduire les idées scientifiques au bon moment, et à étayer l'utilisation qu'en font les élèves, est au centre d'une éducation à la science fondée sur l'investigation.

Évaluation

Dans le contexte de la construction des notions-clés, l'évaluation de l'apprentissage des élèves sert deux ambitions :

- fournir le « feed-back » dont ont besoin tant les enseignants pour ajuster leur enseignement que les élèves pour diriger leurs efforts plus efficacement (évaluation formative) ;
- garder la trace des progrès de l'élève en fonction des divers objectifs de l'éducation à la science (évaluation sommative).

Il importe de souligner qu'il ne s'agit pas de deux sortes d'évaluation, mais plutôt de deux buts différents et d'importance égale, pour lesquels on se sert de l'évaluation. Seule l'utilisation qui est faite de ce que l'évaluation a révélé sur l'apprentissage désigne celle-ci comme formative ou comme sommative, et non le type de données collectées, la manière dont elles ont été collectées ou le moment de la collecte.

Évaluation formative

L'utilisation formative de l'évaluation est un processus circulaire continu durant lequel l'information sur les idées et les capacités des élèves renseigne l'enseignement en cours et facilite l'implication active des élèves dans l'apprentissage. Elle fait partie intégrante de l'enseignement et d'une pratique efficace dans toutes les matières. L'évaluation formative demande à l'enseignant et aux élèves de rassembler, à un moment donné, ce qui est accepté comme évident et de prendre des décisions quant aux étapes suivantes de l'apprentissage et à la manière de les aborder. Les étapes suivantes sont

celles qui conduisent l'élève vers les objectifs particuliers d'une leçon. Une grande part de l'évaluation formative consiste, pour les enseignants, à partager leurs objectifs avec les élèves afin que ceux-ci réalisent quel est le but de leur travail, c'est-à-dire quels sont les savoirs qu'ils sont capables d'acquérir. Rendre explicites à leurs yeux les exigences de qualité avec lesquelles on juge leur travail les aide également à diriger leurs efforts plus efficacement. En même temps, l'enseignant appréhende comment les objectifs à court terme des leçons guident les élèves vers des objectifs à long terme, y compris vers la compréhension des notions-clés.

Le *feed-back*, ou retour d'expérience, joue un rôle important dans l'évaluation formative, pour les élèves comme pour les enseignants, dans la mesure où il permet d'utiliser ce qui résulte clairement de l'apprentissage actuel pour préparer l'apprentissage futur. Le *feed-back* du professeur vers les élèves donne à ces derniers des informations qu'ils utilisent pour progresser dans leur apprentissage. La recherche sur le contenu et la forme du *feed-back* vers les élèves indique qu'il est plus efficace quand il fournit des indications précises sur les manières de procéder plutôt qu'un simple jugement, des remarques ou des notes, qui indiquent seulement si le travail est jugé bon, ou non. Le *feed-back* vers l'enseignement est ce mécanisme par lequel les professeurs utilisent les remarques des élèves et leur travail pour ajuster les défis qu'ils leur proposent. Juger

des capacités des élèves à franchir certaines étapes facilite l'ajustement de l'enseignement, de telle sorte que les exigences des activités ne soient ni trop grandes, au risque de placer la réussite hors d'atteinte, ni trop simples, pour rester stimulantes.

Alors, comment demande-t-on aux enseignants d'utiliser l'évaluation formative en vue de développer les notions-clés ? Les fausses évidences issues des idées préexistantes des élèves peuvent être mises au clair en posant à ceux-ci des questions qui les encouragent à développer leur pensée, plutôt que des questions de type quiz, auxquelles on attend qu'ils donnent « la bonne réponse » : par exemple, « que pensez-vous que... ? » plutôt que « qu'est-ce que... ? ». Les réponses à de telles questions, posées durant les activités, peuvent être orales ou écrites, ou même prendre la forme de dessins, de schémas conceptuels, etc. Interpréter ce qui est découvert en termes de progression vers des objectifs d'apprentissage permet aux enseignants de choisir les étapes suivantes et de donner aux élèves un feedback sur la façon d'avancer. L'implication des élèves dans ce processus les aide à saisir les buts de leur travail et les critères à viser, et leur permet d'endosser la responsabilité de leur apprentissage et de réfléchir à ce sujet.

Évaluation sommative

L'autre but que l'évaluation doit prendre en compte, c'est la nécessité de noter et de mettre en forme

l'apprentissage à certains moments, dans un bulletin. Cela renvoie à la réussite sur une période de temps définie, et non aux objectifs détaillés des leçons, qui sont, eux, l'objet de l'évaluation formative. L'évaluation sommative est utilisée pour informer les parents, les autres enseignants et les élèves eux-mêmes de ce que ces derniers ont accompli en termes d'objectifs et de normes. Les écoles s'en servent pour enregistrer et suivre la progression des individus et des groupes. Quand elle est bien faite, l'évaluation sommative fournit aussi des définitions exemplaires et opérationnelles de ce que signifie comprendre les notions et de la façon dont la compréhension est révélée à travers des mises en pratique variées de l'apprentissage. Les critères appliqués pour juger de la réussite composent des normes exprimant des attentes claires pour les élèves, les enseignants et les autres. L'évaluation sommative doit également aider l'apprentissage, mais dans le long terme plutôt que de manière immédiate, comme le fait l'évaluation formative.

L'évaluation sommative exerce une pression forte sur le contenu des programmes et sur la pédagogie, et, lorsqu'elle est mal conduite, son rôle peut être restrictif. Les impacts négatifs apparaissent quand les outils d'évaluation ne reflètent pas de manière adéquate les buts poursuivis : par exemple, quand ils évaluent la connaissance d'un fait alors que la capacité à appliquer des idées est le but véritable. L'impact est exacerbé par

l'usage inapproprié des résultats des élèves, sous forme de score à une épreuve de contrôle, pour l'évaluation à haut niveau et à grands enjeux, des enseignants et des écoles. Cette tendance pousse les enseignants à « enseigner en vue du contrôle » et désamorce les tentatives de centrer les programmes sur les notions-clés, quand celles-ci ne font pas partie des tests. Pour des raisons de justice, l'évaluation par les contrôles exige des mesures aussi fiables que possible. Mais la demande de fiabilité maximale a pour effet de rétrécir l'objet de l'évaluation et compromet la validité de celle-ci. Les études montrent également que, lorsque le test de performance devient le facteur dominant dans une classe, l'évaluation sommative évince l'évaluation formative.

Améliorer les méthodes d'évaluation sommative

Pour que l'évaluation sommative joue un rôle efficace dans le développement des notions-clés, il faut concevoir et adopter des méthodes d'évaluation qui dégagent des signes évidents de leur compréhension. Des efforts ont déjà été entrepris pour créer des méthodes d'évaluation plus cohérentes avec les objectifs d'une éducation à la science basée sur l'investigation. Mais il y a encore beaucoup de chemin à faire avant que l'évaluation sommative de l'élève soit en accord avec un processus d'apprentissage et une pédagogie qui promeuvent les notions-clés. Les critères PISA (Programme international pour le suivi des acquis des élèves) pour

la science ont élargi l'étendue de ce qu'il est possible de faire dans des tests écrits, mais en soulignant en même temps les limites d'un test écrit pour évaluer un élève individuellement. D'autres méthodes non basées sur des questions écrites, soit utilisées seules, soit en combinaison avec des réponses écrites, sont utilisées dans plusieurs pays pour les qualifications de haut niveau, comme les épreuves de sélection à l'entrée des études supérieures. Par exemple, à partir de notes de cours ou de classeurs de cours, de devoirs pratiques, de projets, de présentations et d'entretiens. L'usage croissant de questionnaires à l'écran et d'essais proposés (que PISA veut développer) possède un potentiel considérable pour évaluer l'application des notions.

Plusieurs de ces approches requièrent un engagement plus important, et une plus grande faculté de jugement de la part des professeurs qu'il n'en est exigé dans les examens traditionnels. Si ces approches de l'évaluation sommative veulent produire des données d'une fiabilité acceptable, elles doivent réduire les biais et les erreurs inhérents au jugement des enseignants. Il existe plusieurs moyens efficaces d'améliorer la fiabilité du jugement des enseignants pour arriver au niveau d'une évaluation sommative sûre. Les principaux sont la modération de groupe – quand des enseignants se réunissent pour examiner des échantillons du travail de l'élève –, l'utilisation de travaux évalués en tant qu'exemples et l'utilisation d'un test de référence comme élément de

contrôle. La modération de groupe a une grande valeur, non seulement au regard de l'amélioration de la fiabilité des résultats, mais comme forme de développement professionnel. L'expérience permet aux enseignants d'approfondir leur compréhension des critères utilisés dans l'évaluation et du processus même de l'évaluation, ce qui bénéficie de surcroît à l'amélioration de l'évaluation formative des enseignants. Conduire l'évaluation de cette manière signifie que les évidences tirées de l'évaluation formative en cours contribuent à l'évaluation sommative et harmonisent les objectifs de l'évaluation au lieu de les mettre en conflit.

Il existe sans aucun doute un besoin de stratégies et d'outils d'évaluation sommative, qui correspondent au contenu et à la pédagogie nécessaires pour le développement des notions-clés. Mais plus encore, dans de nombreux pays, une meilleure pratique de l'évaluation exige un changement de politique quant à la manière dont est évaluée la qualité de l'enseignement et des matériels scolaires. Le recours aux résultats que les élèves obtiennent aux tests, comme seule et unique mesure de la qualité de l'enseignement et de l'efficacité de l'école, sans égard pour les disparités dans le recrutement des élèves, devrait être remplacé par des méthodes plus valides, qui reflètent les objectifs de l'éducation moderne, et par des outils d'évaluation adaptés. Sans ce changement de politique, même les meilleures procédures d'évaluation sont minées de l'intérieur par la pression de la conformité

aux exigences, qui mène à une interprétation étroite des critères et à des pratiques excessivement influencées par ce qui peut être testé.

Résumé des implications

En résumé, revenons à la question de la manière dont un travail conduit dans la perspective des notions-clés affecte les expériences d'apprentissage des élèves, en considérant tour à tour le contenu des programmes, la pédagogie et l'évaluation. Même si l'éducation à la science par l'investigation et l'évaluation formative est déjà pratiquée, il faut aller plus loin pour que les élèves bénéficient vraiment de la compréhension graduelle des notions-clés que nous avons identifiées. Voici, rassemblant les points abordés plus haut, quelques traits essentiels du travail avec les notions-clés.

Contenu

- Les enseignants sont capables d'expliquer comment les objectifs des cours et des activités sont liés aux notions-clés et justifient ainsi le temps consacré à ces activités.
- Les enseignants sont conscients des étapes successives dans l'abstraction qui mène aux notions-clés.
- Les élèves travaillent sur des sujets choisis en raison de leur relation claire, aux yeux des enseignants et de n'importe quel observateur, avec une ou plusieurs des notions-clés.

- Le débat sur leurs investigations, celles des autres et celles des scientifiques, présentes ou passées, permet aux élèves de comprendre la façon dont les évidences acquises sont utilisées pour développer des idées.
- À travers leurs activités, les élèves sont capables de développer leur compréhension jusqu'au point approprié dans leur progression vers les notions-clés.

Pédagogie

- Les enseignants aident les élèves à développer les capacités et les attitudes requises pour rassembler les évidences pertinentes afin de tester les idées et de répondre aux questions grâce à l'investigation.
- Les élèves peuvent observer directement les faits et les phénomènes, et de les explorer expérimentalement quand c'est possible.
- Les étudiants ont l'opportunité de poser des questions et de trouver des réponses à l'aide de l'investigation, et de réfléchir sur la façon dont ce processus mène à des idées plus grandes et plus utiles.
- Les enseignants aident les élèves à comprendre la façon dont les idées qui émergent de leurs investigations en classe sont en lien avec leur expérience quotidienne, à reconnaître les liens entre les expériences nouvelles et les expériences passées, et entre les idées anciennes et les idées nouvelles.
- Les élèves ont le temps de réfléchir sur leurs investigations et sur la manière dont leurs idées ont pu

évoluer à la suite de la collecte et de l'énoncé des évidences.

- Les enseignants aident les élèves à reconnaître que les affirmations sur les causes d'un phénomène doivent être étayées par des évidences raisonnables et crédibles, et que la connaissance scientifique n'est pas une question d'opinion, bien qu'elle puisse être modifiée ou affinée à la lumière de nouveaux résultats, faisant surgir de nouvelles évidences.

Évaluation

- Les enseignants utilisent l'évaluation formative pour inciter les élèves à s'engager activement dans l'apprentissage, en s'assurant qu'ils comprennent bien le but de leurs travaux et la façon dont on juge leur qualité.
- Les enseignants utilisent leurs observations sur l'apprentissage en cours pour aider les étudiants dans leur apprentissage approfondi, en leur donnant un retour (feed-back) sur la manière d'améliorer leur travail et d'avancer en direction des notions-clés.
- Les enseignants utilisent ce qui émerge clairement de la progression des élèves pour ajuster leur niveau d'exigence et leur rythme de travail, afin de s'assurer que l'apprentissage est bien compris et progresse vers les notions-clés.
- Les méthodes d'évaluation sommative permettent aux élèves de montrer leur compréhension des notions-clés en leur donnant l'occasion de les utiliser pour expliquer des faits et des phénomènes du monde extérieur.

6

MISE EN PLACE DES NOTIONS-CLÉS

De nombreux aspects politiques et pratiques influencent la mise en place de tout changement dans l'éducation. En voici trois, qui affectent particulièrement la mise en place d'un travail portant sur les notions-clés :

- la forme et le contenu des programmes scolaires nationaux, qui ont des conséquences en termes de contenu, de pédagogie et d'évaluation ;
- le rôle-clé des enseignants et de leur connaissance des programmes, et de la pédagogie, qui détermine de façon cruciale les opportunités d'apprentissage des élèves ;
- l'évaluation formative de l'enseignement et de la pratique des élèves en classe, qui informe sur les décisions à prendre pour améliorer cette pratique et tirer le meilleur parti des ressources de développement professionnel des enseignants.

Les notions-clés dans les textes des programmes nationaux

Le rôle des textes des programmes scolaires nationaux consiste à définir les objectifs de l'apprentissage et les principes qui doivent guider leur mise en place, mais il ne consiste pas à proposer des activités pédagogiques : c'est là le rôle des unités d'enseignement, ou des modules. Avoir pour but général d'aider tous les élèves à développer les notions-clés a des implications sur la façon dont les contenus des programmes sont exposés. Bien que les cadres des programmes puissent spécifier d'autres résultats attendus de l'apprentissage, telles des compétences propres à l'investigation scientifique, notre souci principal concerne ici la façon dont les idées de science sont exprimées. Cela doit être fait dans des termes que tout le monde peut comprendre, non seulement les enseignants, les chercheurs en éducation et les scientifiques, mais aussi les parents et tous ceux qui sont mêlés à l'éducation des élèves. Décrire la progression vers les notions-clés, comme nous l'avons fait dans le chapitre 4, éventuellement avec plus de détails et d'exemples, est un bon moyen d'affirmer que le but ultime est bien la compréhension des relations, et non l'énumération d'une série de faits ou d'une collection de « petites idées ». Le texte des programmes doit aussi indiquer clairement que le processus de développement des notions et de leur compréhension doit être progressif et continu. Le but doit être de rendre les enseignants, les parents et les autres personnes capables

d'identifier le cours de la progression vers les notions-clés, et donc de percevoir clairement comment des activités spécifiques contribuent à cette progression.

Exprimer les notions-clés DE science

Il existe aujourd'hui des exemples de textes de programmes nationaux qui incluent l'affirmation d'objectifs globaux, exprimés sous forme de notions-clés qui, bien qu'elles ne soient pas précisément les dix que nous avons identifiées, sont suffisamment similaires pour servir le même propos. Par exemple, les notions développées progressivement dans les programmes allant du début de l'école élémentaire jusqu'en fin de collège en France³, correspondant assez bien aux idées 1, 3 et 6, doivent s'inspirer de cet intitulé très général : « La structure de l'Univers et de la matière.⁴ »

Mais la façon dont les objectifs généraux sont décomposés en objectifs d'étape ou d'année est importante pour faire comprendre la continuité nécessaire et la progression graduelle dans le développement des notions-clés. Celles-ci doivent être présentes tout le long de la description des objectifs d'apprentissage, à chaque étape. Pour faire comprendre la notion de

3. Soit l'ensemble 1-9 dans la notation anglo-saxonne.

4. Socle commun de connaissances, de compétences et de culture, promulgué en France en 2015 et remplaçant la version antérieure, plus élaborée et précise quant aux objectifs de connaissances, promulguée en 2006.

progression, il ne suffit pas d'affirmer ce qui doit être appris en termes de sujets ou de mots-concepts comme *force*, *électricité* ou *matériaux*. Pour être utile, il faut indiquer le niveau de compréhension, ainsi que les relations et les connexions attendues à chaque étape.

La plupart des textes des programmes scolaires, outre le recensement des concepts qui doivent être appris, donnent une liste de compétences liées à l'investigation scientifique, ou de pratiques qui doivent être développées à chaque étape. En général, ces deux sortes d'exigences sont énumérées séparément. Mais certains programmes développés récemment expriment les objectifs à la fin de chaque étape, ou de chaque année, en combinant compétences et concepts. Par exemple, les programmes écossais présentent les objectifs d'apprentissage sous la forme « je peux... » ou « je sais... ». En voici un extrait, tiré de la partie relative aux notions-clés de biodiversité et d'interdépendance, pour la fin de la quatrième année :

« Je peux aider à concevoir une expérience pour découvrir de quoi les plantes ont besoin pour grandir et se développer. Je peux observer, enregistrer et retenir ma découverte, et grâce à ce que j'ai appris, je peux cultiver, à l'école, des plantes qui se portent bien. »

Le programme *K-12 Science Education*, aux États-Unis, présente les résultats attendus en termes de « ce

que peut faire un élève qui a compris » sous la forme d'une série d'affirmations qui combinent pratiques et concepts généraux. Par exemple :

« Mener une investigation sur les forces à l'œuvre entre deux aimants ou plus, afin d'identifier des régularités. »

« Utiliser des modèles pour expliquer les effets de forces en équilibre ou en déséquilibre dans un système. »

La forme de ces affirmations signale que la compréhension des notions doit être développée à travers l'investigation et, en même temps, que ces capacités d'investigation sont développées et utilisées en relation avec un contenu scientifique. Cependant, bien qu'elles ne visent clairement pas à restreindre les combinaisons de capacités et de contenus, il y a une forme d'arbitraire dans ces affirmations au sujet des capacités et des contenus qui leur sont liés. En outre, la complexité des affirmations obscurcit parfois la relation entre les notions à chaque étape menant aux notions-clés générales.

Niveau de détail

Les textes des programmes nationaux varient au sujet de la durée des étapes de l'apprentissage et des résultats attendus. Dans certains cas, ce qui doit être appris

est défini année après année et, dans d'autres, en termes d'expérience acquise et d'objectifs remplis à la fin de la période, d'apprentissage, longue de deux ou trois ans (cycles). Un programme trop détaillé transforme les activités de science en routine, une sorte de pas-à-pas pour répondre à des exigences, plutôt que de prendre du temps pour assurer une compréhension profonde. L'excès de détails limite la possibilité pour les enseignants de prendre en compte l'intérêt des élèves. Plus encore, plus les spécifications sont détaillées, plus il est difficile de prendre des décisions concernant la séquence, et plus grand est le risque que les détails obscurcissent les buts généraux – le développement des notions-clés et des capacités d'investigation scientifique. L'énumération des notions spécifiques et des capacités que les élèves devraient maîtriser à un moment donné devrait être justifiée en termes de progression vers ces objectifs généraux. C'est particulièrement important aux articulations entre les phases éducatives, par exemple entre le primaire et le secondaire. Quand cette structure n'est pas explicite, le contenu du programme paraît n'être rien de plus qu'une sélection arbitraire de choses à enseigner, fondée sur la tradition et sur ce qui est le plus facile à évaluer.

Inclure les idées SUR la science

L'attention accordée aux notions-clés dans la rédaction des programmes scolaires varie également beaucoup

selon les pays. Si les idées 11 et 12, portant sur la nature de la science, sont prises en compte, elles sont en général accompagnées de l'affirmation qu'elles vont se développer grâce à l'investigation scientifique. C'est-à-dire que les occasions de développer des capacités de science sont également des occasions de réfléchir sur la façon dont la compréhension scientifique se construit grâce à ces activités. Quoi qu'il en soit, sans références plus explicites au sein des programmes – par exemple, dans les programmes anglais, les buts liés à l'expression « travailler scientifiquement » –, on voit aisément comment ces occasions peuvent être facilement oubliées dans l'élaboration des programmes d'études.

En ce qui concerne les idées 13 et 14, sur les relations entre la science et les autres disciplines STEM, et sur les applications de la science, elles sont incluses de diverses manières. Dans certains cas, c'est au moyen de références croisées, la plupart du temps entre les sciences et les mathématiques. Cependant, ces liens ont tendance à être vus comme facultatifs quand il s'agit d'organiser les programmes des classes, souvent autour d'un enseignant unique et de groupes unidisciplinaires, plutôt qu'en groupes multidisciplinaires, dont les membres apportent leur expertise de spécialistes et créent ensemble une expérience d'apprentissage coordonnée. Une autre approche consiste à enchâsser les références aux applications des sciences dans la description des grands objectifs généraux, comme,

par exemple, le débat autour des questions éthiques et morales soulevées par le développement des techniques génétiques liées à l'ADN. Une troisième voie, peut-être plus efficace, consiste à traiter les liens entre les domaines comme un pan des programmes à part entière. *A Framework for K-12 Science Education*⁵ en est un bon exemple. L'ingénierie et les applications de la science y sont identifiées comme une notion centrale de la discipline, de la même manière que la physique et les sciences de la vie. Cependant, il reste à savoir jusqu'à quel point ces diverses tentatives témoignent d'une compréhension accrue des liens entre la science et d'autres domaines, en particulier la technologie, l'ingénierie et les mathématiques.

Compréhension des notions-clés par les enseignants

Les implications concernant le contenu des programmes, la pédagogie et l'évaluation, discutées au chapitre 5, soulignent les exigences qui pèsent sur les

5. Cadre général donné aux États-Unis à l'enseignement scientifique par le National Research Council, qui représente l'Académie des sciences, l'Académie des sciences de l'ingénieur et l'Académie de médecine. Le *K-12* concerne tous les niveaux d'enseignement depuis le *kindergarten* (maternelle) jusqu'à la 12^e année, soit la fin du lycée (*high school*) – voir www.nap.edu/openbook.php?record_id=13165.

professeurs, chargés de s'assurer que l'apprentissage des sciences par les élèves se construit progressivement comme un tout cohérent, et ne reste pas un ensemble de faits déconnectés. Cela a des conséquences pour les enseignants du primaire et du secondaire, pour les formateurs des enseignants et pour les chercheurs.

Les enseignants des écoles primaires font face à un défi particulier dans leur relation avec les notions-clés en science. D'abord, les activités des jeunes enfants sont généralement centrées sur l'exploration de leur environnement proche et sur la distinction entre les êtres vivants et non vivants qu'il abrite. Ces investigations et ces observations conduisent à de « petites idées », dont les relations avec les notions-clés de science peuvent paraître ténues. Il est donc plus difficile en primaire de garder à l'esprit le lien avec les notions-clés.

Ensuite, dans de nombreux cas, leur propre connaissance de la science laisse les enseignants sans prise personnelle sur les notions-clés, à un certain niveau, et sans grande possibilité de comprendre comment les informations dont ils disposent sont reliées entre elles. Ils sont donc susceptibles d'être mal préparés à repérer les liens entre les idées développées dans les activités en classe et les notions plus largement applicables et d'être en mauvaise position pour aider les élèves à développer eux-mêmes les notions-clés. Le manque de confiance dans leur propre pratique de l'enseignement de la science, résultant d'une faible exposition personnelle

à l'activité scientifique et à la compréhension née de cette expérience, est une difficulté supplémentaire. En revanche, les enseignants du primaire ont des atouts. En tant que généralistes, ils ont avec leurs élèves des relations plus proches que les enseignants spécialisés du secondaire. De plus, conscients de ne pas être des experts, ils préparent souvent très soigneusement les activités pratiques de science pour leurs élèves ; ils proposent des expériences stimulantes que les élèves apprécient et qui leur donnent une approche positive de la science. Mais se concentrer sur le « faire », au détriment de la discussion et de la réflexion, nécessaires pour que les activités débouchent sur une compréhension, est un inconvénient.

Approches de la formation professionnelle

L'idéal serait que tous les enseignants possèdent une compréhension personnelle des notions-clés DE science et SUR la science. Son absence ou son manque, résultant de leur propre éducation scolaire à la science, est un défi considérable qui résulte de la formation initiale des enseignants ainsi que de leur formation continue. Évidemment, il est impossible de condenser la totalité de la science dans le temps limité dédié à la formation initiale des enseignants. Mais les enseignants et les formateurs sont des adultes intelligents. Ils ont une expérience vaste et pertinente, et souvent une connaissance plus étendue qu'ils ne le réalisent vraiment. En tant qu'adultes – et il

faut bien souligner que cette approche n'est pas valable pour des élèves – aborder les notions-clés sous une forme largement descriptive peut les aider à donner du sens à leur propre expérience. Cela peut leur permettre d'assembler des fragments de savoir et, vraiment, leur procurer le plaisir de donner sens à des choses qui auparavant leur semblaient être au-delà de leur compréhension.

«Aborder» signifie ici beaucoup plus que la lecture et la discussion des descriptions narratives des notions-clés, telles qu'elles sont présentées dans le chapitre 4. Cela signifie prendre en compte les connaissances actuelles selon lesquelles l'apprentissage se construit dans les interactions entre ceux qui apprennent, adultes comme écoliers. Débattre, avec les autres, des idées avancées dans les descriptions narratives, permet aux professeurs de tirer parti de leurs propres expériences et de celles des autres pour donner sens à cette «histoire» en évolution. La compréhension individuelle est influencée par les opinions des autres dans une interaction constante avec le groupe et chacun de ses membres. Cette co-construction sociale de leurs idées ne conduira sans doute pas les professeurs à une saisie totale des notions-clés, mais elle amorcera avec un peu de chance chez eux un processus continu de compréhension approfondie, susceptible de leur permettre d'aider leurs élèves dans leurs progrès.

De telles expériences doivent être associées à l'implication des enseignants dans l'apprentissage de la science à travers des investigations à leur niveau, afin qu'ils

développent leur compréhension de la nature de l'investigation scientifique. Par conséquent, les enseignants et les stagiaires ont besoin de temps et d'occasions de questionner et d'explorer des choses simples tirées de leur quotidien (par exemple : pourquoi le papier-toilette est-il constitué de plusieurs couches ? pourquoi la glace flotte-t-elle ? pourquoi l'extérieur d'une canette sortie du réfrigérateur se couvre-t-elle de buée ? pourquoi certaines asperges sont-elles vertes et d'autres blanches ? pourquoi le cerveau ne sait-il pas faire deux tâches simultanément). Durant ces activités, les enseignants ne sont pas invités à se livrer à un jeu de rôle, mais à devenir de vrais chercheurs, penchés sur ces phénomènes banals. Réfléchir sur leur compréhension initiale, sur ce qu'ils ont découvert de nouveau et comment, leur donnera peut-être un aperçu de la façon dont se constitue le savoir scientifique. Une telle expérience fournira aux enseignants une préparation pour aider leurs élèves à comprendre les notions SUR la science (les notions 11 et 12 en particulier) tout autant que les notions DE science.

Tout aussi importante que ces expériences de première main dans la formation des enseignants, il faut considérer la mise à disposition de dispositifs de soutien suivi pour développer leur compréhension de la science et d'une pédagogie efficace sous une forme accessible tout au long de leur vie active. Internet peut jouer un rôle-clé en tant que source d'information, de préférence sous la forme de publications numériques sur mesure,

conçues pour répondre aux besoins des enseignants. Par ailleurs, une compréhension personnelle de la science et de la façon d'enseigner des concepts particuliers peut naître, par exemple, du contact direct avec des enseignants plus expérimentés et avec des scientifiques. Il existe des preuves convaincantes du fait que les enseignants apprennent très efficacement au contact des autres enseignants et que l'accès à l'expérience des autres tient ici une place importante. De nombreux aspects interactifs, dont ce dernier n'est pas le moindre, entrent en jeu dans la mise en place des changements requis pour travailler en direction des notions-clés en pratiquant un enseignement basé sur l'investigation.

L'analyse des besoins des enseignants en formation professionnelle et la question de savoir comment y répondre au cas par cas sont des domaines dans lesquels des recherches demeurent nécessaires. Cependant, nous proposons dans le sous-chapitre suivant quelques pistes préliminaires sur la façon d'identifier les aspects de leur pratique dans lesquels les enseignants pourraient avoir besoin d'aide, toujours en relation avec l'enseignement des notions-clés.

Évaluation formative pour l'enseignement des notions-clés

Nous utilisons ici le mot *évaluation* parce que l'enjeu est bien l'enseignement et non la notation de l'apprentissage

des élèves. Il s'agit de collecter et d'utiliser des données pour améliorer l'enseignement, spécifiquement dans des pratiques de classe qui permettent aux élèves de développer leur propre compréhension des notions-clés. Nous ne nous intéressons pas ici à l'ensemble des pratiques efficaces pour l'éducation à la science, mais seulement à cet élément-clé, tout en y incluant nombre d'aspects d'un apprentissage fondé sur l'investigation, dans la mesure où celui-ci conditionne largement une compréhension en profondeur.

*Indicateurs du travail des élèves
en direction des notions-clés*

Dans ce contexte, l'évaluation formative implique la collecte et l'utilisation de données sur les aspects pertinents de l'enseignement afin d'identifier à quels endroits les pratiques répondent aux attentes et à quels endroits des améliorations sont nécessaires. Tandis que l'apprentissage est évalué en fonction des buts des activités, l'évaluation de l'enseignement s'effectue en fonction d'indicateurs ou de normes d'efficacité d'une pratique de classe. La première étape de l'évaluation consiste donc à établir ces indicateurs. Ils peuvent s'exprimer en termes d'activités des élèves et en façons de travailler qui les aident à comprendre les notions-clés. Par exemple, les indicateurs d'une bonne pratique sont susceptibles d'inclure le fait que les élèves aient la possibilité :

- de comprendre le sens de leurs activités ;
- d'explorer de nouveaux objets et de nouveaux phénomènes de manière informelle, et de « jouer avec les idées » en préliminaires à une investigation plus structurée ;
- d'établir des liens entre les expériences nouvelles et les expériences précédentes ;
- de travailler de façon collaborative avec les autres, de communiquer leurs propres idées et d'écouter les idées des autres ;
- de présenter des preuves convaincantes pour soutenir leur argumentation ;
- de s'impliquer dans des discussions pour défendre leurs idées et leurs explications ;
- d'appliquer leurs connaissances dans le contexte de la vie réelle ;
- de revenir avec un regard autocritique sur les processus et les résultats de leurs recherches.

Toutefois, les occasions offertes aux élèves de vivre ces expériences dépendent de l'organisation de leur enseignant et de la façon dont ses intentions sont traduites en pratique. C'est pourquoi le recours à des indicateurs en relation avec l'enseignement représente une approche plus directe pour identifier l'aide dont les enseignants peuvent avoir besoin. Un tel ensemble d'indicateurs – qui décrit les aspects approuvés de la pratique –, a deux buts : indiquer les données à collecter et offrir un critère pour juger si un enseignement satisfait ou non aux standards attendus.

Indicateurs pour un enseignement orienté vers les notions-clés

Les suggestions qui suivent veulent illustrer ce que sont les indicateurs et le processus d'évaluation liés à un enseignement orienté vers les notions-clés. Les indicateurs utilisés en pratique doivent émerger des débats entre les enseignants sur la façon de décrire un tel enseignement. Ces discussions ont une fonction formative : elles aident les enseignants à mieux comprendre ce qui est en jeu, tout en assurant que l'évaluation sera complètement ouverte, afin que chaque personne concernée connaisse les raisons pour lesquelles ces données sont rassemblées et l'usage qui sera fait de ces évidences. Il est important que les enseignants connaissent les bases de l'évaluation si l'on veut qu'ils prennent part volontairement à l'amélioration de leur pratique.

Formuler les indicateurs sous forme de questions est assez utile. Par exemple, l'enseignant :

- a-t-il une idée claire de la manière dont les activités aident les élèves à comprendre une ou plusieurs notions-clés ?
- donne-t-il aux élèves le temps d'explorer une situation nouvelle et de discuter leurs idées de départ d'une manière informelle ?
- aide-t-il les élèves à reconnaître les relations entre idées et expériences nouvelles, et idées et expériences antérieures ?
- discute-t-il avec ses élèves de la manière dont les idées issues de leurs recherches sont reliées à leurs expériences quotidiennes ?

- construit-il consciemment des idées plus amples en montrant comment des idées particulières expliquent un éventail de faits et de phénomènes ?
- discute-t-il avec ses élèves de la manière dont leur collecte de données et leur usage de celles-ci leur permettent de tester leurs idées, comme le font les scientifiques ?
- aide-t-il les élèves à réfléchir à leurs propres investigations et à élaborer des idées sur la nature de l'activité scientifique ?
- s'assure-t-il que les élèves tirent un enseignement de leurs expériences, de leurs idées ou de leurs constructions qui « ne marchent pas » et ne regardent pas celles-ci comme des échecs ?
- saisit-il l'occasion de parler avec ses élèves de la façon dont les idées scientifiques sont utilisées dans les investigations scientifiques ou dans les avancées technologiques qui font la une de l'actualité ?
- utilise-t-il des exemples tirés de l'histoire, adaptés à l'âge des élèves, pour leur montrer comment les idées scientifiques ont évolué, et pour quelles raisons ?

Rassembler des données pour évaluer l'enseignement

Les indicateurs eux-mêmes attirent l'attention sur les sources d'information utiles pour l'évaluation. Ce sont les plans de cours des enseignants, les notes des enseignants sur les progrès des élèves, les cahiers des élèves,

la discussion avec les élèves et, si possible, l'observation de l'enseignement. Il est parfois utile que quelqu'un – un mentor, un formateur ou un autre enseignant – assiste au cours. Les enseignants peuvent collaborer dans la collecte d'informations relatives aux indicateurs en assistant aux cours des autres. Et s'il est impossible de solliciter l'aide d'un observateur, les enseignants peuvent toujours obtenir des informations utiles en relisant leurs plans de cours, leurs notes et leurs archives (y compris des captations vidéo de leurs cours), et en prenant le temps de parler avec leurs élèves de ce qu'ils pensent de leurs cours. Pour les enseignants qui ne sont pas habitués à une présence étrangère dans leur classe, l'auto-évaluation est parfois préférable, au moins au début.

Les cahiers des élèves, à la disposition des enseignants et des observateurs, constituent une source précieuse d'informations sur les activités des élèves, car ils enregistrent la manière dont la science a été enseignée, et à propos de quel sujet. L'analyse des cahiers livre des éléments très convaincants sur les communications entre élèves, leur compréhension des concepts et des procédures, et la qualité du retour d'expérience de l'enseignant en direction des élèves.

Interpréter les éléments d'évaluation

Bien sûr, les enseignants ne vont pas satisfaire tous les indicateurs de cette liste dans chaque cours ou dans chaque séquence d'activités. Cependant, si aucune

trace de certains éléments n'apparaît durant un certain temps, il est important de se demander « pourquoi sont-ils absents ? » si l'on veut que l'évaluation soit vraiment formative. Les raisons trouvées indiqueraient alors l'aide requise dans certains domaines de la compréhension du contenu ou de la pédagogie. Une telle évaluation est particulièrement pertinente dans le cadre du développement professionnel, lorsqu'on introduit dans l'enseignement des changements aussi fondamentaux que le travail basé sur l'investigation et les notions-clés. Elle n'a pas besoin de répondre à tous les indicateurs, mais peut être utilisée pour fournir un feed-back sur des aspects particuliers de la pratique que l'enseignant veut changer. Il est essentiel que les enseignants gardent le contrôle de ces processus qui doivent être compris comme faisant partie de leur apprentissage ou de leur perfectionnement professionnel, et non comme une occasion de prononcer des jugements sur leur façon de travailler.

Commentaire de conclusion

La bonne mise en œuvre d'un changement dans l'éducation, comme dans tout autre domaine d'activité, dépend de plusieurs facteurs : de la reconnaissance de la nécessité du changement, de la conviction que le changement proposé aura l'effet désiré et de l'acceptation des conséquences pour les nombreux éléments

interconnectés qui déterminent la pratique de l'éducation.

Pour les auteurs, la nécessité de faire évoluer l'éducation à la science est apparue évidente à la lecture des rapports sur la perception négative que les élèves avaient de son utilité et de son intérêt pour eux. Les principaux facteurs responsables de cette situation sont des programmes scolaires surchargés et trop détaillés, une évaluation dominée par les tests, qui encourage l'enseignement de faits déconnectés, et l'attachement à des méthodes d'enseignement qui freinent le passage vers une pédagogie fondée sur l'investigation. Il en résulte que l'éducation à la science, dans de nombreux endroits du monde, échoue à préparer les jeunes gens à un monde que la science, et ses applications en technologie et en ingénierie transforment rapidement. Une telle préparation implique que chacun, et pas seulement ceux qui sont susceptibles d'exercer un métier faisant appel aux sciences, a besoin d'une compréhension générale des notions-clés DE science et SUR la science pour prendre part, en tant que citoyen informé, aux décisions qui affectent son bien-être et celui des autres.

Dans cet ouvrage, nous avons dit, longuement, la nécessité de cerner les objectifs de l'éducation sous la forme d'un ensemble d'idées globales, appelées « notions-clés » parce qu'elles expliquent toute une gamme de phénomènes connexes. Nous avons relevé les divergences et proposé quelques démonstrations

des avantages potentiels attendus en identifiant ce petit nombre d'idées fortes, dont la moindre n'est pas qu'il faut faire une place à la pédagogie basée sur l'investigation. Permettre aux élèves de faire l'expérience de la collecte et de l'utilisation de l'évidence dans l'activité scientifique, et d'en apprécier la valeur, est essentiel pour développer chez eux la compréhension du monde qui nous entoure et de la façon dont nous lui donnons du sens. Nous soutenons qu'un programme scolaire encadré par les notions-clés est nécessaire pour adopter une approche fondée sur l'investigation.

Pour provoquer le changement dans la manière dont les buts de l'éducation à la science sont conçus et exprimés, il faut plus qu'une révision des programmes scolaires. Ce qui se passe en classe est influencé par de nombreuses pratiques interdépendantes, les principales, discutées ici, étant l'évaluation des élèves, l'éducation des enseignants et la pédagogie. Cependant, il existe de nombreux autres facteurs déterminants, comme l'organisation des écoles, la façon dont les enseignants et l'enseignement sont estimés et évalués, le rôle et les attentes des parents, le soutien donné par la direction et les inspecteurs, et, bien sûr, la politique du gouvernement. Un vrai changement passe par la coordination de toutes ces sources d'influence. Les enseignants sont, au bout du compte, responsables de l'expérience que font les élèves en apprenant de la science, mais ils ne peuvent provoquer un vrai

changement à eux seuls. Dans bien des cas, un changement de politique est nécessaire pour que l'innovation ne soit pas étouffée par les pratiques existantes.

NOTES SUR LA TRADUCTION EN FRANÇAIS

Bien que la pédagogie d'investigation (*inquiry*), qui forme le filigrane de cet ouvrage, soit identiquement perçue dans les mondes anglo-saxons et francophones, quelques remarques doivent être faites sur de subtiles différences qui apparaissent au fil de la traduction de l'anglais vers le français.

Big idea. Ce terme, employé dans le titre anglais de cet ouvrage paru en 2015, *Working with Big Ideas of Science Education*, est apparu dans la littérature anglo-saxonne depuis deux décennies environ. Nous le traduisons ici souvent par « notion-clé », désignant ainsi un concept scientifique ayant un certain degré d'abstraction et capable d'un pouvoir explicatif étendu. Nous utilisons aussi les termes « idée », « grande idée », « idée englobante », « idée ample », etc. lorsque le contexte

s’y prête sans ambiguïté. Une *big idea* est également compris comme formé par l’agrégation de *small ideas*, qui résultent d’expériences ou d’observations parcel-laires et sont progressivement unifiées par un concept plus fédérateur – nous dirons ici « petites idées » ou « idées parcellaires ». Au fil du texte, le mot « idée » peut également être utilisé dans son sens courant.

Éducation à la science. La science – pas plus que les scientifiques – n’a pas la prétention d’imposer une vision scientifique de l’éducation, même si les apports contemporains des neurosciences enrichissent le regard porté sur l’acte d’apprendre ou sur l’acte d’enseigner. Traduire *science education* par « éducation scientifique » pourrait donc induire un dangereux contresens intel-lectuel. Il faudrait pouvoir dire à la fois « éducation à la science » et « éducation par la science », mais la pre-mière expression nous a suffi. L’objectif qu’elle recouvre se distingue à l’évidence des sciences de l’éducation, lesquelles, en français, désignent un champ universi-taire très large et parfois flou, mais il peut rejoindre par bien de ses aspects la didactique des sciences. Par ses objectifs et contenus fort précis, l’éducation à la science se distingue également de l’ensemble des « éducations à... » (la citoyenneté, la morale, le développement durable, la santé, etc.), aujourd’hui si fréquemment rencontrées.

Expérience. En français, le mot désigne à la fois un ressenti particulier et personnel, et une expérience scientifique, qui implique un protocole d'observation et de modification d'un phénomène naturel. Le français dispose également du terme « expérimentation », qui peut avoir le sens scientifique précédent, mais aussi désigner plus largement la mise en œuvre d'un projet (social ou autre) dont on observera les résultats. Nous avons généralement précisé par le contexte comment entendre la traduction. En France, on évoque les expériences de Galilée, de Newton, de Pasteur.

Programme. Traditionnellement, en français, il s'agit, au sein du système éducatif, de l'ensemble des instructions délivrées aux professeurs par les autorités de l'éducation et fixant les contenus à enseigner, année par année. L'anglais utilise *curriculum*, souvent dans une acceptation plus large, désignant un parcours scolaire plus global. Le mot français peut également s'employer dans le sens d'un « programme de travail », désignant alors l'organisation pratique d'une leçon de sciences (séance) ou d'un ensemble de leçons (séquences). L'idée de progression, au sens de parcours successif d'étapes aux acquis cognitifs progressifs, découle dans les deux langues de la mise en œuvre du programme.

Évidence. Il s'agit d'un des termes, très employé dans l'ouvrage, pour lequel la difficulté est la plus grande.

En français, l'évidence est « ce qui entraîne immédiatement l'assentiment de l'esprit » (*Le Petit Robert*), comme dans les expressions « se ranger à l'évidence », « c'est évident » (ce qui saute aux yeux et à l'intellect). Cette notion d'immédiateté ne se retrouve pas exactement dans l'usage anglais, qui désigne par *evidence* une conviction qui emporte l'adhésion par le rassemblement d'éléments progressivement construits et portés au jour. Il ne s'agit néanmoins pas d'une preuve, laquelle résulterait d'un processus logique au pouvoir de conviction plus fort, définie en français comme ce qui « est susceptible d'établir la vérité d'une chose, qui corrobore une assertion, qui sert à établir qu'une chose est vraie » (*Le Petit Robert*). L'*evidence* de l'anglais est donc à mi-chemin entre l'évidence et la preuve en français, et l'usage fréquent du mot dans l'ouvrage original reflète bien la situation pédagogique, le tâtonnement guidé au cours duquel se forge progressivement une nouvelle vision des choses, plus convaincante et plus scientifique, à partir du regard extérieur porté sur ces choses (comme le rappelle l'étymologie *e-videre*). Faute de terme parfaitement adéquat en français, nous avons le plus souvent conservé le mot *evidence*, parfois en le précisant, mais son usage pourra intriguer le lecteur francophone.

Littéracie scientifique. Traduction littérale et peu élégante de l'anglais *scientific literacy*, cette expression fait pendant opposé à *illiteracy* traduit par « illettrisme ».

Nous ne l'avons pas utilisée dans la présente traduction. Le terme « innumérisme » a fait récemment (2010) son apparition au Québec pour désigner un manque de pratique dans l'usage des nombres (arithmétique), mais il ne s'applique pas aux sciences de la nature traitées dans cet ouvrage.

Sciences de la nature. Nous regroupons sous ce vocable l'ensemble des sciences faisant appel à l'observation des phénomènes naturels et à l'expérimentation sur ceux-ci. Cela permet de distinguer clairement ces sciences des mathématiques, comme le fait la pratique anglo-saxonne qui se réfère généralement à *mathematics and natural sciences*. Les sciences naturelles des anciens programmes en France sont aujourd'hui désignées par les expressions « sciences de la vie » ou « sciences du vivant » d'une part, et « sciences de la Terre » (ou « géosciences », ou encore « sciences de la planète ») de l'autre.

RÉFÉRENCES

Références en anglais

- AAAS (American Association for the Advancement of Science), *Benchmarks for Science Literacy. Project 2016*, Oxford University Press, 1993.
- , *Atlas of Science Literacy*, Washington DC, AAAS et NSTA, 2001.
- Abrahams, I. et Reiss, M.J., « Practical work : its effectiveness in primary and secondary schools in England », *Journal of Research in Science Teaching*, 49(8), 1035-1055, 2012.
- Alberts, B., « Considering science education », éditorial, *Science*, 319, mars 2008.
- Alexander, R. (dir.), *Children, Their World, Their Education. Final Report and Recommendations of the Cambridge Primary Review*, Londres, Routledge, 2010.
- Biosciences Federation, *Enthusiating the Next Generation*, Londres, Biosciences Federation, 2005.
- Bransford, J.D., Brown, A. et Cocking, R.R. (dir.), *How People Learn, Brain, Mind, Experience and School*, Washington DC, National Academy Press, 2000.
- Bruner, J.S., *The Process of Education*, New York, Vintage Books, 1960.
- Butler, R., « Enhancing and undermining intrinsic motivation : the effects of task-involving and ego-involving evaluation on inte-

- rest and performance», *British Journal of Educational Psychology*, 58(1), 1-14, 1988.
- Carnegie et Institute for Advanced Study, *The Opportunity Equation Transforming Mathematics and Science Education for Citizenship and the Global Economy*, New York, Carnegie-IAS, 2010.
- Concoran, T., Mosher, F.A. et Rogat, A., *Learning Progressions in Science*, Philadelphie, Centre on Continuous Instructional Improvement, Teachers College, Columbia University, 2009.
- Devés, R., *Science Education Reform in Chile (1990-2009)*, contribution au séminaire du Loch Lomond, 2009.
- Duncan, R.G., Rogat, A.D. et Yarden, A., «A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th-10th grades», *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 655-674, 2009.
- Duschl, R.A., Schweingruber, H.A. et Shouse, A.W., *Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8*, Washington DC, The National Academies Press, 2007.
- Fernández de la Garza, G., *Brief Overview of the Evolution of the Science Curriculum for the Elementary Schools in Mexico*, contribution au séminaire du Loch Lomond, 2009.
- Gustafson, B.J. et Rowell, P.M., *Big Ideas (and Some Not So Big Ideas) for Making Sense of Our World. A Resource for Elementary Science Teachers*, Edmonton, University of Alberta, 2008.
- Harlen, W., «Teaching and learning science for a better future», *School Science Review*, 90(333), 33-41, 2009.
- , *Assessment and Inquiry-Based Science Education: Issues in Policy and Practice*, Trieste, Global Network of Science Academies (IAP) Science Education Programme, 2013.
- www.interacademies.net/activities/projects/12250.aspx
- Honey, M., Pearson, G. et Schweingruber, H. (dir.), *STEM Integration in K-12 Education: Status, Prospects and an Agenda for*

RÉFÉRENCES

- Research*, Washington DC, The National Academies Press, 2014.
- Howard-Jones, P., Pollard, A., Blakemore, S.J. *et al.*, *Neuroscience and Education : Issues and Opportunities*, Londres, TLRP/ESRC, 2007.
- Learning and Teaching Scotland/SQA, *Curriculum for Excellence : Sciences Experiences and Outcomes* : www.educationscotland.gov.uk/Images/sciences_experiences_outcomes_tcm4-539890.pdf
- Léna, P., *Big Ideas, Core Ideas in Science – Some Thoughts*, contribution au séminaire du Loch Lomond, 2009.
- Mansell, W., James, M. et ARG (Assessment Reform Group), *Assessment in Schools. Fit for Purpose? A Commentary by the ESRC Teaching and Learning Research Programme*, Londres, ARG and TLRP, 2009.
- Massachusetts Science and Technology/Engineering Curriculum Framework*, octobre 2006 : www.doe.mass.edu/frameworks/scitech/1006.pdf
- Miaoulis, I., « K-12 Engineering – the Missing Core Discipline », in Grasso D. et Brown Burkins M. (dir.), *Holistic Engineering Education Beyond Technology*, New York, Springer, 2010.
- Millar, R., « Big ideas » in *Science and Science Education*, contribution au séminaire du Loch Lomond, 2009.
- Millar, R. et Osborne, J., *Beyond 2000. Science Education for the Future*, Londres, King's College School of Education, 1998.
- Mohan, L., Chen, J. et Anderson, C.W., « Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems », *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 675-698, 2009.
- NAEP, *Science Framework for the 2009 National Assessment of Educational Progress*, National Assessment Governing Board, US Department of Education, 2008.
- NRC (National Research Council), *National Science Education Standards*, Washington DC, The National Academies Press, 1995.

- , *A Framework for K-12 Science Education*, The National Academies Press, Washington DC, 2012.
- , *Developing Assessment for the Next Generation Science Standards*, Washington DC, The National Academies Press, 2014.
- Oates, T., «Missing the point: identifying a well-grounded common core. Comment on trend in the development of the National Curriculum», *Research Matters*, octobre 2009.
- , *Could Do Better: Using International Comparisons to Improve the National Curriculum in England*, Cambridge Assessment, 2012.
www.nationalnumeracy.org.uk/
- Pellegrino, J.W., Chudowsky, N. et Glaser, R. (dir.), *Knowing What Students Know: The Science and Design and Educational Assessment*, Washington DC, National Academy Press, 2001.
- Songer, N.B., Kelcey, B. et Gotwals, A.W., «How and when does complex reasoning occur? Empirically driven development of a learning progression focused on complex reasoning about biodiversity», *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 610-631, 2009.
- Twenty-First Century Science specifications ; Science Explanations and Ideas About Science*: www.nuffieldfoundation.org/twenty-first-century-science
- Wei Yu, *A Pilot Program of «Learning by Doing» in China's Science Education Reform*, Nanjing, Research Centre of Learning Science, Southeast University, 2009.
- Wellcome Trust, *How Neuroscience Is Affecting Education: A Report of Teacher and Parent Surveys*, 2014.
www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@msh_peda/documents/web_document/WTP055240.pdf
- Wilson, M. et Draney, K., «On coherence and core ideas», article commandé par le NRC Board of Education Meeting, août 2009.

RÉFÉRENCES

Zimba, J., *Five Areas of Core Science Knowledge: What Do We Mean by «STEM-Capable»?*, contribution pour l'Advanced Study Commission on Mathematics and Science Education of Carnegie Institute (voir Carnegie et IAS), 2009.

Références en français

- Bentolila, A., Quéré et Y., *Langue et science*, Plon, 2014.
- Charpak, G., *La Main à la pâte. Les sciences à l'école primaire*, Flammarion, 1996.
- Commission européenne, *L'Enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe*, rapport Rocard, Commission européenne, 2007:
http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_fr.pdf
- Elsenbroich, D., *Découvrir le monde à sept ans. Quelle éducation pour le XXI^e siècle ?*, Actes Sud, 2003.
- Guyon, E., Pedregosa, A. et Salviat, S. (dir.), *Matière et matériaux. De quoi est fait le monde ?*, Belin, 2010.
- Haïssinski, J. et Langevin-Joliot, H., *Science et Culture. Repères pour une culture scientifique commune*, Apogée, 2015.
- Houdé, O., *Le Raisonnement*, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? », 2014.
- La main à la pâte, *Les 10 Principes de La main à la pâte*, 1998 : www.fondation-lamap.org/fr/page/105/principes-et-enjeux
Fondation La main à la pâte : www.fondation-lamap.org

- Lautrey, J., Rémi-Giraud, S., Sander, E. et Tiberghien, A., *Les Connaissances naïves*, Belin, 2008.
- Léna, P., Quéré, Y. et Salviat, B., *29 notions-clés pour savourer et faire savourer la science – primaire et collège*, Le Pommier, 2009.
- Léna, P., *Enseigner, c'est espérer. Plaidoyer pour l'école de demain*, Le Pommier, 2012.
- « Le Socle commun de connaissances, de compétences et de culture » :
<http://eduscol.education.fr/cid86943/nouveau-socle-commun-pour-2016.html> Maisons pour la science au service des professeurs :
www.maisons-pour-la-science.org
- « Missions et formation des enseignants de demain », *Administration & Éducation*, n° 4, 2014.
- Pasquinelli, E., *Du labo à l'école : science et apprentissage*, Le Pommier, 2015.
- Salviat, B., Proust, B. et Allégraud, K., *Une énergie, des énergies. Comment fonctionne le monde ?*, Belin, 2015.

LES AUTEURS

Derek Bell

Derek Bell est enseignant, chercheur, conseiller et défenseur de l'amélioration et de l'enrichissement de l'éducation pour tous. Il a travaillé dans des écoles et des universités avant de devenir directeur général de la prestigieuse Association for Science Education (ASE) britannique et directeur de l'Éducation au sein de la puissante fondation Wellcome Trust, axée sur la santé, l'éducation, la médecine au sein de la culture. Il est toujours très actif en faveur de l'éducation à travers sa société de conseil, Campanula Consulting, auprès de nombreuses commissions au niveau national et international, et publie de nombreux articles. Il est actuellement administrateur de la fondation IBM Trust UK (fondation privée qui promeut, entre autres, l'éducation scientifique au travers des nouvelles technologies), de l'Understanding Animal Research (défense d'une utilisation raisonnée des expérimentations sur les animaux) et du Centre of the Cell (un centre d'éducation à la science situé au cœur de laboratoires de recherches biomédicales, au Royaume-Uni), membre du Inter Academies Partnership Global Science Education Committee (association internationale des

Académies de science, en faveur de l'éducation à la science, dont font également partie plusieurs auteurs de cet ouvrage) et du jury de la European Union Competition for Young Scientists (concours annuel organisé à l'initiative de la Commission européenne pour favoriser les échanges entre étudiants en science au sein de l'Union européenne). La Manchester Metropolitan University lui a remis en 2011 le titre de docteur émérite en éducation. Derek est directeur de LEARNUS (*think tank* consacré à la réflexion sur les liens entre neurosciences, anthropologie et éducation), professeur en éducation au College of Teachers (formation professionnelle des enseignants) et chercheur agrégé invité à l'Institute of Education du University College de Londres (UCL).

Rosa Devés

Rosa Devés a reçu un doctorat en biochimie à l'université de Western Ontario (Canada), après lequel elle a rejoint le département de physiologie et de biophysique de la faculté de médecine de l'université du Chili, à Santiago du Chili. Professeure, elle a enseigné la physiologie cellulaire à des étudiants de licence et de maîtrise, et participé au développement des études doctorales, y compris au financement d'une École doctorale de sciences biomédicales qu'elle dirigea durant deux ans. Elle a également contribué à la création de l'Institut des sciences biomédicales, né de la fusion de douze départements de sciences basiques et précliniques. Elle a été directrice adjointe de ce nouvel institut de 1997 à 2000.

Parallèlement à sa carrière universitaire et scientifique, elle s'est engagée dans l'amélioration de l'éducation à la science dans les écoles, en collaborant de 1999 à 2002 avec l'Unité d'évaluation des programmes au ministère de l'Éducation, en tant que coordinatrice de l'équipe de scientifiques qui développaient les nouveaux programmes. Conjointement aux actions conduites aux États-Unis par

le National Science Resources Center et en France par *La main à la pâte*, en collaboration avec l'Académie des sciences de France et celle des États-Unis, elle a lancé, avec le professeur Jorge Allende, le programme ECBI (Educación en Ciencias Basada en la Indagación) qui œuvre en partenariat avec le ministère de l'Éducation, l'Académie des sciences et des universités, dans le but de donner à tous les enfants du Chili une éducation à la science de grande qualité.

Doyenne de l'université du Chili de 2010 à 2014, elle a dirigé deux projets pour le développement de l'éducation comme objectif stratégique de cette université, et le renforcement des politiques en faveur de l'égalité et de l'intégration, dans le but de donner plus de chances aux élèves provenant de milieux défavorisés. En juillet 2014, elle est nommée vice-présidente des Affaires académiques de l'université du Chili. Elle est correspondante de l'Académie des sciences du Chili depuis 2003.

Hubert Dyasi

Hubert Dyasi, après son doctorat, est devenu professeur, spécialiste de la formation des enseignants en science. Il a conçu, dirigé et mis en œuvre dans le monde entier de nombreux programmes d'éducation à la science basés sur l'investigation et présenté ses travaux, approuvés par ses pairs, lors d'innombrables conférences et colloques. Il a également coécrit de nombreux ouvrages, parmi lesquels: *America's Lab Report* (National Academy Press, 2005), *Designing Professional Development for Teachers of Science and Mathematics* (Corwin Press, 2003), *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning* (National Academy Press, 2000) ou *The National Science Education Standards* (National Academy Press, 1996). Il a reçu les distinctions suivantes: Distinguished Service to Science Education, Outstanding Educator, Membership of

the National Research Council's Committee on K-12 Science Education, ainsi que le titre de professeur invité au California Institute of Technology (CalTech) et au All Souls College (Oxford). Il est diplômé de l'Institut national pour l'éducation à la science (National Institute for Science Education) et membre du conseil d'administration de l'Inter-Academy Panel's Science Education Programme (regroupement des Académies des sciences du monde entier).

Guillermo Fernández de la Garza

Guillermo Fernández de la Garza est président-directeur général de la United States-Mexico Foundation for Science (FUMEC), une organisation sans but lucratif financée par les gouvernements du Mexique et des États-Unis. Dans le cadre de la FUMEC, il a développé des groupes de travail binationaux dans des domaines comme l'aérospatiale, les technologies de l'information et de la communication, l'industrie de pointe, et facilité l'innovation dans les petites et moyennes entreprises. Il est diplômé en ingénierie et en physique de l'Université nationale autonome de Mexico, en économie et en ingénierie de l'université de Stanford (Californie), et a terminé des études supérieures en ingénierie nucléaire à l'Institut de physique nucléaire (Orsay) et en administration commerciale dans une grande école de commerce internationale (IPADE, Mexico). Il a travaillé à des programmes d'innovation pour l'industrie, pour des universités et pour le gouvernement mexicain. Guillermo a contribué de façon remarquable à la vulgarisation des sciences et au développement de l'éducation à la science. Il est l'un des membres fondateurs de la Société mexicaine pour la vulgarisation des sciences et des techniques (SOMEDICYT) et anime l'équipe de scientifiques, d'éducateurs et de dirigeants d'entreprises qui ont fondé *CHISPA*, un magazine scientifique pour enfants, publié mensuellement au Mexique entre 1978 et 1998. *CHISPA* a remporté

des prix mexicains et internationaux, et une sélection des articles du magazine est toujours diffusée par le ministère mexicain de l'Éducation. Les rencontres entre enfants et chercheurs, organisées par *CHISPA*, sont devenues les « Samedis et dimanches de la science », soutenus par l'Académie des sciences du Mexique. En 2002, avec le soutien de la FUMEC, il a lancé le programme INNOVEC (Innovation in Science Education), une organisation à but non lucratif œuvrant pour la mise en place de l'éducation à la science par l'investigation dans les écoles publiques du Mexique. Il a organisé conjointement avec le ministère de l'Éducation et l'Académie des sciences du Mexique les premiers essais, au Mexique, du programme scolaire Sciences et Technologie pour les enfants. Guillermo a reçu en 2008 le prix Purkwa, remis par l'Académie des sciences (France) et l'École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne pour récompenser les pratiques innovantes en faveur de l'éducation des enfants à la science.

Wynne Harlen

Après un diplôme en sciences physiques obtenu à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), Wynne Harlen a occupé plusieurs postes d'enseignante, de formatrice d'enseignants et de chercheuse en sciences de l'éducation et de l'évaluation. En 1985, elle est nommée professeure d'éducation à l'université de Liverpool, chaire Sydney Jones, où elle met sur pied le Centre de recherche et de développement pour la science à l'école primaire (Centre for Research and Development in Primary Science). En 1990, elle déménage pour Édimbourg et devient directrice du Conseil écossais pour la recherche en éducation, poste qu'elle occupe jusqu'en 1999. Elle travaille désormais en tant que consultante, en Écosse. Elle a conduit plusieurs projets dans les domaines de la recherche, du développement professionnel et du développement des

programmes scolaires, et publié plusieurs livres sur l'éducation à la science et sur l'évaluation. Wynne a été membre à vie, puis membre honoraire, de l'Association du Royaume-Uni pour l'éducation à la science (UK Association for Science Education, ou ASE), qu'elle a présidée en 2009. Elle a participé à la revue *Primary Science Review* (« Revue pour la science en primaire ») entre 1999 et 2004. Elle a été premier président du groupe d'experts OCDE-PISA en 1998-2003. Elle a présidé un groupe de travail de la Royal Society (State of the Nation Report on Science and Mathematics Education 5-14). Elle a été décorée de l'ordre du Mérite britannique par la reine en 1991, pour services rendus à l'éducation, et a reçu en 2001 de l'ASE une distinction pour services rendus à l'éducation à la science. En 2008, conjointement avec Guillermo Fernández de la Garza, elle a reçu le prix Purkwa international, ainsi qu'une reconnaissance pour sa contribution à la promotion de l'éducation en science par l'investigation, remise par le ministère de l'Éducation du Mexique et INNOVEC en 2011.

Pierre Léna

Pierre Léna est professeur émérite d'astrophysique à l'université Paris-Diderot. À l'Observatoire de Paris, il a contribué à l'astronomie infrarouge, à l'observatoire VLT (Very Large Telescope) du mont Paranal au Chili et aux nouvelles techniques optiques appliquées à l'imagerie astronomique (optique adaptative, interférométrie). Il a dirigé l'École doctorale Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France pendant plusieurs années. Il est membre de l'Académie des sciences, de l'Academia Europaea et de l'Académie pontificale des sciences. Son implication dans les questions d'éducation l'a conduit à diriger l'Institut national de recherche pédagogique (1991-1997). Avec Georges Charpak, lauréat du prix Nobel, et Yves Quéré, il fut le fer de lance d'un projet d'éducation à

la science par l'investigation dans les écoles primaires, *La main à la pâte* soutenu par l'Académie des sciences. Ce projet, qui développe des activités en classe et des ressources pour les enseignants, est officiellement reconnu dans les programmes scolaires nationaux français en 2002. Son succès a conduit l'Académie des sciences à créer en 2005 un bureau permanent sur l'éducation, que Pierre a dirigé jusqu'en 2011. Depuis 2012, l'Académie des sciences, en partenariat avec les Écoles normales supérieures de Paris et de Lyon, a créé une fondation de coopération scientifique *La main à la pâte* qui, avec une équipe de vingt-cinq personnes, se consacre à l'éducation à la science, à la recherche et à la coopération internationale – Pierre l'a présidée de 2011 à 2014.

Pour en savoir plus : www.fondationlamap.org et www.academie-sciences.fr/enseignement/generalites.htm

Robin Millar

Robin Millar est professeur émérite en science de l'éducation à l'université de York (Angleterre). Titulaire d'un diplôme en physique théorique et d'un doctorat en physique médicale, il s'est formé à l'enseignement et a enseigné la physique pendant huit ans dans des écoles secondaires d'Édimbourg, avant de rejoindre l'université de York en 1982. Robin a beaucoup publié sur de nombreux aspects de l'enseignement et de l'apprentissage de la science. Ses principales pistes de recherche concernent les modes d'apprentissage des élèves et la conception des programmes scolaires de science, ainsi que le développement de l'évaluation de l'apprentissage de la science. Il a dirigé des projets de recherche sur les travaux pratiques d'investigation en science et sur l'image de la science auprès des jeunes. Entre 1999 et 2004, il a coordonné le réseau de recherche Evidence Based Practice on Science Education (EPSE). Il a participé au développement de plusieurs projets majeurs de programmes scolaires,

dont Science for Public Understanding et Twenty-First Century Science, deux séries de cours pour les élèves du secondaire.

Entre 1996 et 2000, Robin a été membre de la délégation britannique au sein du Labwork in Science Education, financé par la Commission européenne, puis membre du groupe d'experts scientifiques auprès du Program for International Student Assessment (PISA) de l'OCDE, en 2006 et en 2015. Il a présidé la European Science Education Research Association (ESERA) entre 1999 et 2003, et présidé l'Association pour l'éducation à la science, au Royaume-Uni, en 2012.

Michael Reiss

Michael Reiss est professeur titulaire de la chaire de Science Education au sein de l'Institut pour l'éducation du University College de Londres (UCL), professeur invité auprès des universités de Leeds et de York, et du Royal Veterinary College, membre honoraire de la British Science Association et du College of Teachers, maître de conférences à l'université de Helsinki, directeur du Salter-Nuffield Advanced Biology Project et membre de l'Académie des sciences sociales britannique. Ancien directeur de l'Éducation auprès de la Royal Society (2003-2006), il a écrit abondamment au sujet des programmes scolaires, de la pédagogie et de l'évaluation en éducation à la science. Au cours des vingt dernières années, il a dirigé un très grand nombre de recherches, d'évaluations et de missions de conseil financées par les Research Councils britanniques, des structures gouvernementales, des fondations et des agences internationales. www.reiss.tc

Patricia Rowell

Patricia M. Rowell est professeure émérite au sein du département Elementary Education de l'université de l'Alberta (Canada). Ses

recherches, financées par des bourses fédérales canadiennes, portent principalement sur la nature des stratégies de discours employées dans l'enseignement et dans l'apprentissage des sciences en primaire, dans des conditions formelles ou informelles. Elle est membre fondatrice du Centre pour l'éducation aux mathématiques, à la science et à la technologie de l'université de l'Alberta, et elle a été en charge de la production de ressources pédagogiques basées sur l'investigation, distribuées aux enseignants dans toute la province de l'Alberta. Elle a travaillé en tant qu'éducatrice en science au Botswana et en Namibie (deux ans dans chaque pays), et dirigé des groupes de travail en Afrique du Sud, en Chine, au Chili et en Australie. Patricia est diplômée en biochimie (universités de Londres et d'Oxford) et en science de l'éducation (université de l'Alberta).

Wei Yu

Wei Yu est professeure, fondatrice du Laboratoire central du développement de l'enfant et de l'apprentissage de la science du ministère de l'Éducation, à l'université de Nanjing, en Chine. Durant sa longue carrière d'enseignante et de chercheuse en électronique, ses grandes réussites concernent le développement de la bio-électronique et les fondements de l'électronique moléculaire et biomoléculaire. Elle a également contribué de façon importante à la réforme de l'enseignement supérieur et à distance en Chine entre 1993 et 2002, alors qu'elle était vice-ministre de l'Éducation. Depuis 1994, elle est très impliquée dans la réforme de l'enseignement de la science en tant que membre du International Council for Science – Committee for Capacity Building in Science (ICSU-CCBS) et en tant que membre du Inter-Academy Partnership Science Education Programme depuis 2002. Wei Yu a développé de nouvelles recherches interdisciplinaires entre les neurosciences et l'éducation. En même temps, elle a introduit en Chine « Learning

by Doing», une approche de l'éducation à la science basée sur l'investigation, et créé le site www.handsbrain.com.

Elle a présidé le Comité chinois de révision des normes nationales pour l'éducation à la science dans les écoles primaires. En 2010, son équipe et elle ont été récompensées par le First Ranking National Price of Education Reform in Chinese Basic Education. Elle a également reçu le prix Purkwa, attribué par l'Académie des sciences (France) et par l'École des mines de Saint-Étienne pour récompenser les pratiques innovantes dans le domaine de l'éducation aux sciences. Elle a reçu le titre de docteur honoraire auprès de neuf universités en dehors de la Chine.

Table des matières

PRÉFACE	p. 5
PRÉSENTATION DE L'ÉDITION FRANÇAISE	p. 9
AVANT-PROPOS	p. 15
1. INTRODUCTION ET INTENTIONS	p. 19
2. Principes	p. 31
3. RÉVISION DES NOTIONS-CLÉS : EXTENSION, AMPLEUR ET IDENTIFICATION	p. 39
4. PROGRESSION ET DÉVELOPPEMENT DES NOTIONS-CLÉS	p. 57
5. ENSEIGNER AVEC LES NOTIONS-CLÉS POUR OBJECTIFS	p. 111
6. MISE EN PLACE DES NOTIONS-CLÉS	p. 139
NOTES SUR LA TRADUCTION EN FRANÇAIS	p. 161
RÉFÉRENCES	p. 167
LES AUTEURS	p. 177



Imprimé en France par la Nouvelle Imprimerie LABALLERY à Clamecy
N° d'imprimeur : 507284 - Dépôt légal : juillet 2015
N° d'édition : 74650932-01