

LA REPRÉSENTATION SCIENTIFIQUE DE LA RÉALITÉ : EXPÉRIENCE ET EXPÉRIMENTATION À L'ÉCOLE PRIMAIRE

Maria Arcà

Avant même d'envisager la précision de la réalisation ou des résultats, il est méthodologiquement important de s'interroger sur la signification conceptuelle des expérimentations. Si certaines d'entre elles permettent de recueillir des données sur une réalité qui, au niveau expérimental, est en train de prendre forme, d'autres représentent (de manière déformée, schématique et analogique) des aspects particuliers de la réalité. À l'école, les expérimentations ont généralement une existence autonome et peuvent être exécutées correctement même si elles ne sont pas conceptuellement rapportées à la complexité des phénomènes qu'elles devraient interpréter. Savoir procéder à ces expérimentations est certainement utile mais la connaissance consciente de ce que l'on voudrait montrer ou démontrer ne va pas automatiquement de soi. Il est donc nécessaire de développer, parallèlement, tout un éventail de stratégies cognitives permettant d'établir une relation cohérente entre les faits et leurs explications.

Dès l'école primaire, il est possible de développer des activités de modélisation abstraite à partir d'évidences quotidiennes, en valorisant souvenirs et associations, déductions et inductions issus de l'expérience des enfants. Même les modèles les moins raffinés, dans la mesure où ils sont élaborés de manière cohérente par les enfants, peuvent constituer une trame de références conceptuelles susceptibles de soutenir et de donner une signification même aux activités expérimentales les plus complexes.

"La science n'est pas un simple ensemble de lois, un catalogue de faits indépendants. C'est une création de l'esprit humain doté d'une liberté d'invention au plan des idées et des concepts. Les théories physiques tentent de construire une représentation de la réalité et d'établir des relations avec le vaste monde des impressions sensorielles."

A. Einstein, L. Infeld : "The evolution of Physics"

En Italie, mais pas seulement

dans les lycées :
formes
d'enseignement
basées sur
la transmission
du savoir...

Dans les lycées italiens, les élèves (15-18 ans) étudient généralement la physique, la chimie et la biologie d'une façon livresque, et la possibilité de faire des travaux pratiques – que la section soit littéraire ou scientifique – est souvent réduite à une ou deux fois par an. Dans ces conditions, il est difficile que les élèves puissent "prendre leur temps" et travailler par eux-mêmes. En général les lycéens ne disposent pas d'un niveau d'abstraction qui leur permettrait de se passer d'expérimenter eux-mêmes. Ainsi, conformément à une forme d'enseignement exclusivement basée sur la transmission du savoir, on considère que les adolescents

doivent connaître des règles et des définitions correspondant, *a priori*, à une vérité scientifique absolue, vérité qui doit être assimilée et ne peut être remise en question.

...de même
au collège...

Au collège, on enseigne également les sciences aux élèves (11-14 ans) à travers des leçons théoriques ou en étudiant dans les manuels. Les phénomènes sont décrits, catalogués, expliqués synthétiquement et définis à l'aide d'un langage scientifique dont la terminologie est éloignée du langage courant. Comme on estime que les enfants sont suffisamment grands, on ne leur laisse même pas le temps d'imaginer ce qui peut – ou pourrait – arriver réellement, et la problématique scientifique liée à toute interprétation est bien souvent considérée comme hors de propos.

...et à l'école
primaire

À l'école primaire (6-11 ans), nombreux sont encore les enseignants qui, en science, expliquent le sujet choisi et dictent des définitions guère plus compréhensibles que celles d'un livre. Les enfants les écrivent, les apprennent parfois par cœur, et s'en servent pour cocher la bonne case dans les fiches distribuées de temps en temps pour vérifier leurs connaissances. Si l'on examine de nombreux manuels (et cahiers), il semble qu'une bonne partie de l'enseignement des sciences se développe à partir de propositions "déclaratives" où les mots possèdent une valeur métaphorique que seuls les adultes peuvent saisir. On parle encore de "règne" animal et végétal (que signifie le mot "règne" pour un enfant ?) ; les plantes "se divisent en..." ; les lombrics "appartiennent" aux invertébrés annélides ; les objets plongés dans l'eau "obéissent" au principe d'Archimède et, dans d'autres conditions, aux lois de Newton. Dans le cadre de l'éducation scientifique, un nombre croissant d'enseignants proposent toutefois aux enfants des activités concrètes : manipulation de matériaux, germination de graines, construction de jardins potagers, exploration de l'environnement... jeux physiques qui vont du tir à la corde aux courses de vitesse. Comme toujours, le problème n'est pas de jouer (ou de travailler) dans le concret, mais de tirer d'une expérience des interprétations, des réélaborations et des explications qui embrassent des secteurs plus vastes de la réalité ; autant d'activités susceptibles de conduire à l'usage conscient de stratégies de raisonnement abstrait.

cependant
une évolution
s'amorce
à ce niveau

1. SCIENCE ET EXPÉRIENCE

Il semble important de distinguer l'idée de science en tant que produit culturel élaboré au fil du temps, de l'idée de science en tant que processus de construction, en tant qu'activité de la pensée visant à l'interprétation des phénomènes du monde. Pour engager ce processus, surtout chez les jeunes enfants, on propose souvent des expériences

pratiques conduisant à observer plus attentivement des événements sélectionnés du quotidien.

il y a toujours une relation entre l'expérience des faits et leur interprétation : l'important, c'est de la rendre explicite

Comme le savent tous les bons enseignants, passer – au plan conceptuel – d'une activité de manipulation (ou d'une activité expérimentale) à une réflexion scientifique est tout sauf simple, car cela présuppose l'intervention consciente de capacités cognitives de schématisation, d'interprétation, de généralisation... Mais cela présuppose aussi de préciser les significations d'une expression toute simple, à savoir "faire de la science", en fonction de différents contextes.

Nous pouvons alors nous demander : quelles références empiriques sont nécessaires (ou suffisantes) pour engager la première élaboration d'une connaissance scientifique ? Quelle part la pensée scientifique occupe-t-elle naturellement dans la pensée commune ? Quelle part et quel type de pensée abstraite doivent être impliqués dans la médiation entre les données de l'expérience et leur reconstruction rationnelle ? Comment tirer des faits la connaissance sur les faits ? Il y a en effet beaucoup de moyens – à tout âge et en fonction des objectifs – pour s'interroger sur "comment est fait et comment fonctionne" le monde, de même que les réponses et les niveaux d'approfondissement sont tout aussi nombreux.

les nombreux objectifs du fait de "faire de la science"

Nous omettons volontairement les questions de type épistémologique ou philosophique sur "ce qu'est la science aujourd'hui" et nous commençons donc par nous demander comment, dans différents contextes, "faire de la science" comporte des significations et des objectifs divers. Nous nous proposons ensuite d'analyser, au niveau du concret didactique, certains problèmes qui se posent lorsqu'on tente d'engager, chez les jeunes enfants, un processus d'éducation scientifique visant à stimuler des capacités de raisonnement autonome et cohérent à partir de leur expérience de phénomènes observables. Le contexte de cette recherche est donc représenté par quelques classes de l'école primaire italienne (6-11 ans) et par quelques stages de formation auxquels ont participé les enseignants de l'école obligatoire (6-14 ans).

la science en tant que recherche de nouvelles idées et la science en tant que contenu pour l'enseignement-apprentissage

Notre réflexion peut débuter en analysant les différences entre "faire de la science" à l'école et "faire de la science" dans un laboratoire de recherche. Il est différent d'enseigner la science en pensant que ce qui se fait à l'école constitue une propédeutique destinée uniquement au métier de scientifique, ou de concevoir la science comme une discipline servant également à développer chez l'individu une attitude mentale de type scientifique pouvant lui être utile dans la vie quotidienne. Voilà pourquoi il est important d'encourager l'aspect recherche créative permettant d'élaborer des interprétations originales sur les phénomènes ; il est aussi important de privilégier la "reconnaissance" de ce qui a déjà été assimilé culturellement, c'est-à-dire les connaissances scientifiques organisées qu'il est nécessaire de maîtriser .

2. LA SCIENCE DANS LES LABORATOIRES DE RECHERCHE

la science
comme
découverte :
l'élaboration de
nouvelles idées

des modèles
expérimentaux
en tant que
simulations

comprendre
la réalité en
perfectionnant
les modèles...

On peut penser que la science "professionnelle" est une recherche compétitive, sur un sujet donné, de réponses plus ou moins définies et cohérentes à des questions précises émanant des différents groupes de travail, ceci à partir d'une connaissance approfondie des faits. On ne connaît pas, *a priori*, les résultats mais chaque recherche s'engage après que l'on a pris acte (sur la base d'une bibliographie précise) de ce qu'on pense – à ce moment et dans le monde – sur un sujet donné; des interprétations nouvelles et plausibles se développent. On propose des explications et des modélisations efficaces, mais même les hypothèses les plus acceptées laissent des zones inexplorées dans la connaissance précise des phénomènes : on constate souvent des incongruités, des détails échappant aux schémas connus, des argumentations peu convaincantes... Bien qu'inexpliqués des aspects stimulent la réflexion et la créativité personnelles, conduisent à suggérer de nouveaux modèles, mais comportent toujours une marge de doute ou exigent d'être précisés. Avec l'activité de laboratoire, on cherche des preuves expérimentales entérinant des suppositions ébauchées au plan théorique, on élabore les conditions (artificielles et technologiquement contrôlées) où la simulation des phénomènes se déroulera de manière à confirmer les interprétations. On bâtit des théories complexes en s'appuyant expérimentalement sur la ressemblance entre les modèles et la réalité ; on étend à des systèmes naturels, des données recueillies (ou provoquées) dans des systèmes construits artificiellement, de structure très simplifiée mais adaptés à la mise en évidence d'aspects sélectionnés et autrement invisibles. Théorie et pratique expérimentales sont étroitement liées et se renforcent mutuellement. La connaissance avance à tâtons, projetée vers l'inconnu, mais reposant fermement sur les différentes hypothèses ou théories qui, sur un sujet spécifique, sont discutées, argumentées et défendues par différents groupes. La confirmation de la réponse découle d'un ensemble d'indices, d'un ensemble d'événements qui se réalisent selon les prévisions. Dans le laboratoire, on participe aux discussions, à l'évolution des idées, aux frustrations et aux succès, à l'ajustement continu des expérimentations modifiées pour confirmer des résultats... Tout ceci montre que la recherche ne se déroule aucunement selon les étapes canoniques de la méthodologie scientifique (observation, hypothèse, expérimentation, vérification). Il semble donc impossible de reconnaître l'activité scientifique réelle dans sa description conventionnelle, comme toujours déformante et schématique.

En dépit de l'existence d'une créativité individuelle, la recherche en biologie est encore aujourd'hui un phénomène collectif : on aborde souvent des problématiques à la mode ;

... avec des instruments coûteux...

on utilise ou on se laisse tenter par des technologies d'avant-garde impliquant l'achat d'appareillages de plus en plus automatisés et souvent très coûteux. Avec de tels équipements, chaque laboratoire s'efforce de définir toujours mieux des particularités ou des détails qui, au niveau mondial, dessinent à travers les efforts (compétitifs et pas toujours coordonnés) des projets de recherche différents et financés de diverses manières.

...qui construisent de nouvelles réalités

Les groupes et les chercheurs isolés interagissent dialectiquement ; ils utilisent ou contestent les résultats des autres ; ils imaginent et expérimentent des éventualités imprévues ; ils défendent à l'aide de leurs argumentations les représentations (expérimentales ou mentales) des phénomènes. En laboratoire, l'originalité est indispensable : il faut décrire des faits nouveaux, noter des détails nouveaux, construire d'autres réalités qui dépendent souvent des équipements disponibles. Parfois, dans les laboratoires, prend forme une sorte d'univers parallèle à l'univers réel et qui procède selon des règles qui lui sont propres (on étudie par exemple des souches de cellules cancéreuses cultivées *in vitro* depuis des dizaines d'années, des souches de bactéries et de drosophiles qui n'ont plus d'équivalent dans la nature, des organismes transgéniques, des molécules de synthèse expressément isolées, des fragments d'ADN insérés dans des plasmides ou reproduits à l'aide d'une PCR...). La validité de telles pratiques expérimentales n'est généralement pas remise en question dans la phase de réélaboration cognitive. En biologie, on ne s'interroge pas toujours sur les différences entre ce qui se passe *in vitro* dans des conditions contrôlées, et ce qui se passe effectivement *in vivo*. Ainsi, de nombreuses difficultés surgissent lorsqu'on essaie d'appliquer les résultats obtenus en laboratoire à l'être vivant dans toute sa complexité : l'introduction expérimentale de gènes dans un génome, par exemple, est devenue une pratique courante tandis que la thérapie génique demeure encore assez problématique.

défendre, argumenter, communiquer les résultats obtenus

Les modalités de communication des résultats varient d'une discipline à l'autre, et même si les programmes informatiques sont d'une grande aide en ce qui concerne l'élaboration des données, il est utile de rappeler que seuls certains secteurs de la biologie se servent de modèles mathématiques. Schémas fonctionnels, dessins, élaborations graphiques sont beaucoup plus fréquents et constituent un langage perceptif efficace pour la schématisation et la description des nouveaux résultats.

3. LA SCIENCE À L'ÉCOLE

La science à enseigner ou à apprendre à l'école fait partie d'un patrimoine de connaissances et d'interprétations

la science
en tant que
connaissance
d'un patrimoine
acquis : ce qu'il
faut savoir sur le
monde dont
nous faisons
partie

programmes
et manuels
comme
synthèse
du savoir à
partager...

... sans être
trop créatif

élaborées par l'humanité au cours de son histoire. Parmi celles-ci, certaines semblent encore évoluer tandis que d'autres, particulièrement satisfaisantes, sont considérées comme établies une fois pour toutes et paraissent stables (du moins provisoirement). Par exemple, on retient que les "lois" de la physique, formulées de façon plus ou moins élaborée, sont valables dans n'importe quel temps et dans n'importe quel espace, du moins à notre échelle (certes, il y a la relativité... il y a la mécanique quantique... mais pour le moment, on n'enseigne pas cela à l'école). Justement parce qu'elles semblent se référer à des conceptualisations largement partagées, il est bon que certaines lois et certaines connaissances de base soient connues et assimilées par les nouvelles générations. Nous pensons que, de cette manière, et dans un avenir imprévisible, les enfants seront prêts à interpréter scientifiquement certains aspects de la vie quotidienne, qu'ils acquerront une attitude rationnelle à l'égard des événements habituels et qu'une fois grands, ils seront éventuellement en mesure de développer de nouvelles connaissances.

Les connaissances essentielles et indispensables sur lesquelles reposent les sciences sont définies de manière plus ou moins détaillée dans les programmes ministériels qui indiquent, en fonction de l'âge, ce que tout élève d'aujourd'hui devrait savoir. À quelques nuances près, l'Italie s'aligne sur les contenus européens autour desquels s'organisent les programmes des matières scientifiques, tandis qu'on note des différences importantes quant à l'usage et à la fonction du laboratoire et des activités expérimentales. Pour chaque discipline, les références théoriques considérées comme essentielles et les argumentations qui soutiennent les interprétations élémentaires des phénomènes sont résumées dans des textes ou dans des manuels décrivant schématiquement des explications largement partagées. La "recognition" du savoir est déjà fin prête. Les thèmes sont classés selon un ordre standardisé ; ils suivent une logique didactique qui, en général, ne reflète pas l'histoire de la pensée scientifique, et ils ne mettent pas non plus en évidence la méthodologie qui lie les explications à l'expérience concrète. Chaque argument induit le suivant, jusqu'à la brusque chute de la conclusion, du moins à ce niveau d'apprentissage.

Les contenus se succèdent de page en page en séquences souvent linéaires, et les élèves doivent apprendre synthétiquement et en peu de temps ce que d'autres (les scientifiques) ont mis des centaines d'années à comprendre dans un contexte culturel bien différent de celui d'un cours de science. Dans ce type d'apprentissage, il importe de ne pas être trop "créatif" et de ne pas se poser trop de questions parce que, de toute façon, on n'aurait pas le temps de leur apporter une réponse. La pensée divergente – un talent rare, synonyme de non homologation culturelle – est pénalisée ou

considérée comme une attitude frisant l'extravagance. Ainsi, pour démontrer leurs connaissances, les élèves doivent savoir faire leurs exercices – plutôt que d'affronter des questions – en adaptant leurs réponses à celles qu'accréditent les textes.

les laboratoires
pour démontrer
ce qui doit
arriver...

Dans les salles de travaux pratiques, il règne généralement une atmosphère bien différente de celle qui caractérise les laboratoires de recherche. Ici, on répète des procédures standardisées qui, quand "ça marche", produisent des résultats attendus, déjà définis, visant à la compréhension d'un concept bien précis. Une recherche portant sur les expériences proposées par les manuels de biologie, à différents niveaux scolaires, démontre que les activités décrites s'élèvent environ au nombre de 200 et que celles-ci – substantiellement identiques – sont présentées de la même manière. Mais les indications fournies pour les exécuter sont souvent erronées dans la mesure où elles dérivent de la copie, de la simplification ou de la synthèse d'une même description faite par un auteur qui avait lui-même résumé une description précédente... et ainsi de suite. Quant aux démonstrations, elles sont le plus souvent lues ou racontées selon une curieuse inversion du processus qui devrait consister à partir de la pratique pour arriver au récit et non le contraire. Même lorsqu'on va effectivement en travaux pratiques, c'est presque toujours l'enseignant qui explique et tire au clair ce qu'il faut faire ou regarder ; et les élèves, de leur côté, font de leur mieux pour voir ce qu'il doivent voir. Le temps de la démonstration est toujours très limité et, à cette occasion, les divergences de pensée doivent être opportunément bridées. Pour plus de sécurité, on a l'habitude – à l'école primaire – de dicter les résultats et les conclusions de l'expérimentation afin que les enfants les écrivent correctement dans leur cahier. Au lycée (mais aussi à l'université) les expérimentations faites par autrui font l'objet d'une étude livresque, et les élèves s'entraînent à les répéter mot à mot, en utilisant la terminologie appropriée : ils peuvent ainsi avoir une bonne note aux divers contrôles. Pour ce qui est de la maîtrise des connaissances biologiques, il suffit, dans la plupart des cas, de savoir distinguer et nommer les figures, de savoir reconnaître et décrire les schémas, en somme un exercice de mémoire. Il est évident que tout cela peut être utile – mais peut-être pas nécessaire – mais ce genre d'activité conforte chez les enfants la conviction selon laquelle les explications et les expérimentations ont une vie propre, bien éloignée des faits qu'il faudrait comprendre.

... dans un
temps limité...

... et pour
répondre aux
vérifications

tout le monde
sait que dans
l'enseignement
des sciences,
quelque chose
ne va pas,
mais changer
les choses est
extrêmement
ardu

Le plus étonnant c'est que tout le monde s'accorde – y compris les enseignants – sur des méthodes de travail aux résultats plus que modestes. Mais modifier un enseignement à l'évidence stérile exige des efforts considérables (ce dont le travail de l'INRP témoigne à merveille). Aussi n'est-il peut-être pas inutile de retravailler des situations que tout le monde

connaît pour différencier toujours mieux l'idée de la science en tant que construction de la pensée, de l'idée assimilant la science à une simple pratique, ou pire, à la description d'activités pratiques nommées "expérimentations".

3.1. Mais qu'est-ce qu'une expérimentation ?

En réalité, il n'existe pas de frontière nette entre l'expérience, entendue comme contact initial avec la réalité concrète, et l'expérimentation, c'est-à-dire la réalisation d'un projet de connaissance conformément à une intention préétablie. Cela ne dépend pas seulement du fait que – du moins selon Piaget – les élèves de l'école primaire n'ont pas acquis les capacités de raisonnement formel nécessaires. Mais cela dépend plutôt de l'attitude mentale et des buts explicites à l'aide desquels on met en place des situations dont on observe l'évolution. De fait, en changeant l'objectif cognitif, un même phénomène peut être vécu comme une démonstration, comme une expérience nécessaire pour prendre acte d'une certaine réalité, ou encore comme une intervention sur les faits afin de les expliquer et de les interpréter. Il est important de recueillir des données mais, surtout en biologie, il n'est pas toujours possible (ni même nécessaire) de faire des mesures ou de formaliser le phénomène à l'aide d'instruments mathématiques. Il importe, en revanche, que le développement des structures cognitives se base sur l'expérience concrète en regardant, en vérifiant, en modifiant certains aspects de la réalité, tandis que les finalités qui président aux actions deviennent au fur et à mesure plus claires, et que les interprétations se font plus riches et significatives. Les objectifs de l'expérimentation peuvent être variés comme nous le montrerons à travers les exemples ci-dessous.

le développement des structures cognitives doit se baser sur l'expérience concrète

On peut observer :

- ce qui se passe si... ou ce qui se passe quand... on intervient de manière précise sur un phénomène ;
- comment un phénomène évolue dans le temps selon sa propre nature ou suite à des interventions programmées.

On peut comparer :

- l'évolution de certains processus mis en place dans des conditions différentes ;
- l'efficacité d'une intervention dans des situations différentes ;
- les variations d'une ou de plusieurs variables d'un phénomène.

On peut agir sur la réalité :

- en essayant de la modifier sur la base de connaissances préalablement acquises ;
- en essayant d'en reconstruire certains aspects pour voir si ce que l'on attend arrive (ou pas).

variété des objectifs de l'expérimentation

On peut explorer une situation réelle ou reconstruite en laboratoire :

- en cherchant des relations avec d'autres situations ;
- en procédant à des vérifications pour étayer ou pour élaborer des hypothèses : si cette chose arrive, alors ça veut dire que...

Du point de vue cognitif, on peut superposer à l'expérience (celle-ci correspond à une première et nécessaire prise de conscience des faits) l'expérimentation qui, pour des raisons heuristiques, se propose de modifier la réalité afin de mieux la connaître et l'expliquer, ou afin de réaliser des projets d'interprétation de plus en plus élaborés. Dans ce but, il est souvent utile de rassembler des données quantitatives et qualitatives, de faire des mesures précises, des graphiques, d'opérer des formalisations... sans confondre la fin avec les moyens.

Ainsi, les expérimentations peuvent être associées à des moments d'expérience ; elles peuvent s'enchaîner logiquement afin de vérifier des connexions causales, d'étudier et de modéliser l'évolution des processus, d'établir une distinction entre variables fondamentales et conditions annexes. Toutefois, il semble qu'une participation cognitive personnelle au processus étudié soit toujours nécessaire : de nombreuses expérimentations didactiques ne sont en réalité que des démonstrations ne répondant pas aux vraies questions. Une procédure plus ou moins complexe se substitue, bien souvent, à l'esprit et au but d'une expérimentation. Voilà pourquoi il serait important de trouver des mots différents pour expliquer : a) l'usage des équipements du laboratoire ; b) les expérimentations démonstratives dont les résultats sont d'ores et déjà connus ; c) les expérimentations de recherche, conçues et élaborées pour comprendre quelque chose qu'on ne connaît pas encore (ces expérimentations peuvent être faites même avec des petits). Dans le langage scolaire le terme "expérimentation" est d'une extraordinaire polysémie car il signifie à la fois expérience, démonstration, travail pratique, utilisation d'un appareillage complexe, expérimentation réalisée par tel ou tel scientifique...

C'est justement à cause de cette polysémie qu'il n'est pas facile d'imaginer quelles attentes suscite, dans l'esprit des élèves et du professeur, la phrase rituelle : "et maintenant, on va faire une expérimentation".

3.2. De l'expérience à l'expérimentation

Comme nous le verrons mieux dans les exemples qui suivent, il est clair que n'importe qui peut facilement apprendre et suivre une pratique expérimentale, c'est-à-dire est capable d'apprendre à utiliser un appareil ou à répéter une suite de gestes nécessaires pour obtenir les résultats prévus. Tout le monde peut observer l'évolution programmée d'une séquence de faits, noter les conséquences de certaines actions, dire à quoi sert ce qu'on est en train de faire en

être conscient
de la polysémie
du terme
expérimentation

lisant tout ça dans un livre ou en écoutant le professeur : “Couvrir les feuilles avec du papier d'aluminium, ça sert à voir la photosynthèse” ; “on met le mercure dans le tube pour observer la pression” ; “on laisse le jus de raisin dans l'armoire pour faire du vin” ...

il faut des connexions logiques entre expérimentation et réalité...

Mais tous les élèves ne comprennent pas, au contraire, un point fondamental, c'est-à-dire la connexion logique entre le plan de la reconstruction contrôlée d'un événement et ce qui se passe dans la réalité. Il ne s'agit pas uniquement d'engager des procédures visant à recueillir des données ou à faire des mesures. Ici, la réflexion épistémologique est nécessaire et les questions qu'on doit se poser ne sont pas banales. Pourquoi une expérimentation (organisée matériellement dans un contexte artificiel) démontre-t-elle quelque chose d'autre, c'est-à-dire donne une signification à un phénomène qui advient dans la réalité ? Comment ce qu'on provoque peut-il donner des indications sur ce qui, dans certaines conditions, arrive naturellement ? De quels instruments conceptuels faut-il disposer pour comprendre comment un événement qui se passe dans un appareil ou dans une éprouvette représente une réalité qui, souvent, lui ressemble si peu ?

... mais il faut également des informations et des théories de référence...

Le parcours entre ce que l'on voit et ce que l'on pense est plutôt complexe et varie en général d'un individu à l'autre. Mais il y a des difficultés objectives que tout monde doit affronter et qui peuvent éventuellement être dépassées si l'on domine un entrelacs de connaissances générales renvoyant à des connaissances particulières et vice-versa. On a besoin de stratégies cognitives qui, comme nous le verrons plus loin, permettent d'articuler les raisonnements sur la base d'indices, d'interpréter le monde macroscopique à partir de processus microscopiques, de lier un fait particulier à une théorie plus générale.

... autrement les démonstrations ne démontrent rien

Par exemple, pour assimiler l'idée que, dans la photosynthèse, l'énergie lumineuse se transforme en énergie chimique, il n'est pas suffisant de couvrir les feuilles des plantes avec du papier d'aluminium. De la même manière, la coloration qui apparaît lorsqu'on traite la feuille avec de l'iode ne témoigne pas automatiquement de la présence d'amidon. Même l'enseignant qui connaît parfaitement le mécanisme de la photosynthèse ne s'attarde pas toujours à réactiver les connaissances nécessaires pour que la démonstration donne quelque chose, pour que des faits expérimentaux donnent une signification à ce qui passe au niveau de la feuille verte d'une plante. Plus généralement, les enseignants ne se rendent pas compte de la problématique intrinsèque aux processus expérimentaux à laquelle l'élève se trouve confronté. Il n'est pas dit qu'une coloration bleue (provoquée) soit plus significative qu'une coloration verte (naturelle) pour imaginer l'évolution d'une transformation chimique aussi complexe. Et pour l'enfant, il n'est vraiment pas facile de comprendre que (c'est seulement à la lumière... seulement là

ou se trouve le “vert” ...) des particules invisibles d'eau et de dioxyde de carbone s'unissent chimiquement (ou miraculeusement) pour former quelque chose qu'on appelle du sucre (mais un sucre bien différent de celui qu'on met dans son bol de lait le matin !). Et puis, à ce qu'il semble, les plantes ne sont pas faites en sucre ! Et le bois, comment se forme-t-il ? Pourquoi les transformations successives, qui sont également importantes pour rendre compte de ce qui – au niveau de la perception – va donner une plante, ne sont-elles jamais ni démontrées ni expliquées ? Au lycée, l'expérimentation sur la photosynthèse est – ainsi que quelques autres – incontournable, mais elle y est réalisée avec plus de soin. Ces expérimentations, certes utiles, ne sont pas suffisantes pour forger une pensée et une trame de connaissances, permettant d'envisager la complexité de la vie végétale, les problèmes de différenciation, la relation entre les éléments vivants et les éléments morts, l'efficacité des engrais... ainsi que des problèmes plus généraux tels que la désertification, la monoculture, la culture transgénique, la pollution.

Si l'on ne parvient pas à comprendre quels aspects de la réalité sont représentés dans les expérimentations, ou pourquoi certains aspects ne méritent pas d'être démontrés, les résultats demeurent peu compréhensibles et se présentent comme de minuscules détails de phénomènes infiniment plus compliqués. Certains processus du monde réel sont déformés, schématisés, ralentis, exagérés pour être étudiés. Si les procédures expérimentales ne sont pas comprises, elles ne donnent pas d'accès cognitif à la réalité. Et une expérimentation n'est presque jamais comprise si l'on ne dispose pas déjà d'un modèle mental – articulé et complexe – de la réalité que l'on cherche à interpréter.

les activités
concrètes
peuvent
développer
une pensée
abstraite,
mais il faut
des modèles
mentaux
pour donner
une signification
aux faits

4. APPROCHES DIDACTIQUES

4.1. Comparaison entre des liquides au cours préparatoire

Des enfants du cours préparatoire travaillent depuis longtemps avec des carafes et des verres ; ils transvasent l'eau, s'amuse à faire des gouttes, à verser l'eau dans des filtres ou du tissu. Suivons donc le parcours didactique pour rendre compte des difficultés cognitives cachées dans un phénomène banal, et notons comment, du point de vue méthodologique, on peut élaborer des interprétations à partir de l'expérience.

L'enseignant propose : *verse trois gouttes sur la serviette et après, récupère-les et remets-les dans le verre.*

Les enfants s'y emploient ; évidemment ils n'y arrivent pas et tentent d'expliquer :

une méthodologie
de recherche :
stimuler les
interprétations
plausibles

- *La serviette, c'est ce qui essuie les gouttes, alors si on les met dans la serviette, l'eau sèche et on ne voit pas les gouttes.*
- *Évidemment, parce que l'eau est encore plus fine que les petits trous du filtre, et les gouttes vont finir dans les poils de la serviette.*
- *L'eau n'a pas séché dans la serviette ; elle est encore toute mouillée, elle restera toujours mouillée.*

Mais cette eau a-t-elle séché (et a-t-elle donc disparu dans le néant) ; a-t-elle été séchée par la serviette (et est-elle donc restée dedans) ou a-t-elle été absorbée par les poils, laissant ainsi la table toute sèche ? Quelles sont les différences, non pas seulement linguistiques, entre les termes "sécher" et "absorber" ? Quand donc introduire le verbe "évaporer" ?

L'enseignant propose d'observer ce qui se passe avec l'alcool et en verse un peu dans une assiette en plastique.

- *L'alcool qui est dans l'assiette s'en va.*

Enseignant - *Et où va-t-il ?*

- *Il sèche, l'alcool a séché !*

Enseignant : - *Il est parti quelque part ? Où ça, d'après toi ?*

- *Il a disparu.*

- *Il a été absorbé dans l'assiette.*

L'idée de conservation de la matière est plutôt lointaine. Mais parler du linge qui sèche sans se poser trop de questions sur l'évaporation ou sur ce que devient l'eau fait partie de l'expérience commune.

De nombreux enfants disent que dans le linge sec il y a de l'eau sèche, de l'eau qui n'est pas mouillée, et qui redevient liquide (qui mouille à nouveau) lorsqu'elle entre en contact avec une autre quantité d'eau. De quelle expérience peut bien naître une idée pareille ? Peut-être des taches d'encre sur le cartable qui colorent en bleu l'eau quand on essaye de les ôter ? Quelles expériences scientifiques et quelles analyses quantitatives seraient nécessaires pour corriger ces idées ?

Peut-être que dans l'assiette il y a des petits trous invisibles où va se loger l'alcool, des trous analogues aux poils de la serviette. Pour donner au mot "évaporation" une signification, est-il raisonnable d'imaginer des trous minuscules et invisibles dans un air lui aussi invisible ?

L'enseignant verse quelques gouttes d'alcool dans les mains des enfants : l'alcool sèche (s'évapore) rapidement en provoquant une sensation de froid.

Enseignant : - *Et alors, qu'en avez-vous fait, de l'alcool que je vous ai donné ?*

- *C'est l'air propre qui l'a pris, c'est l'air qui l'a enlevé.*

- *Il a été absorbé par la main, par les petits trous de la peau.*

- *Comment ça se fait qu'il est parti ? On ne sait pas.*

- *Si on met un mouchoir dessus, alors il s'en va dans le mouchoir...*

mais où est
passé l'alcool ?

L'eau sèche
existe-t-elle ?

est-ce que l'air
est comme un
essuie-mains ?

– *Et comment est-ce qu'il peut s'en aller du mouchoir ?*

Les observations et les questions montrent la perplexité des enfants : il n'est guère aisé de leur expliquer ce qu'ils voient, et de nombreuses choses devraient être "vérifiées" pour arriver à une explication acceptable. Comment se convaincre, en effet, que les mains n'absorbent même pas un tout petit peu d'alcool? Seraient-elles sans petits trous? Et le froid ne pourrait-il être une conséquence du mélange entre le sang et l'alcool? À l'aide de quelles expériences peut-on démontrer que ce n'est pas cela qui se passe ?

se sécher,
être absorbé
ou s'évaporer?

Et maintenant l'enseignant met l'eau et l'alcool dans des petits flacons bien fermés et dans des assiettes de porcelaine, en espérant qu'il n'y ait ni "petits trous" ni "poils" qui absorbent le liquide. On observe encore ce qui se passe. Dans l'assiette, l'alcool sèche rapidement, tandis qu'il semble rester à l'identique dans le récipient.

– *Si on le met dans une petite bouteille avec un bouchon, le bouchon l'oblige à rester dans la bouteille ; il ne le fait aller ni en haut ni en bas.*

– *Il a besoin de trous pour sortir.*

– *L'air va l'absorber.*

– *Dans l'assiette, l'air a emporté l'eau et les gouttelettes.*

– *Il a aussi emporté l'alcool, il ne reste que l'odeur.*

Dans cet extrait des conversations entendues pendant une activité qui se déroule sur deux ou trois mois, on peut noter l'attitude propositionnelle de l'enseignant : il fait en sorte que les enfants soient en mesure d'observer des faits différents et de les comparer, sous sa houlette, les élèves découvrent les contradictions ou la véracité de leurs opinions ; mais il se laisse également guider par les observations et les idées des enfants ; il suit un fil logique mais il est capable d'ajuster, au coup par coup, ses propositions en fonction de ce qui ressort de la discussion, ceci pour contester certaines opinions ou pour les entériner.

La méthode de cet enseignant est de type hypothético-déductif mais la phrase "si tu dis ceci, comment est-ce que tu fais pour justifier cela?" est presque toujours implicite dans ses suggestions et dans la recherche d'observations toujours plus précises de la part des enfants. Les enfants ne proposent pas encore d'éventuelles expériences pour vérifier ou confirmer leurs opinions, mais on sent que certains sont prêts à le faire. Pendant ce temps, ils apprennent à suivre l'exemple qu'on leur propose, à partager une façon problématique de travailler et de penser les choses. La constatation progressive de nouveaux faits évidents, la comparaison de situations analogues les conduisent à apprécier l'exigence de cohérence manifestée par l'enseignant et à essayer de la faire leur.

Les attentes de l'enseignant sont, dans ce cas, de faire partager un répertoire phénoménologique assez large à travers l'expérience directe des différents événements pouvant survenir (ou

faire de la science sans avoir hâte de conclure

pouvant être faits par opposition) en explorant un domaine plutôt vaste. Les conclusions qui formalisent le phénomène sont encore lointaines, et il faut y parvenir doucement, en donnant aux enfants le temps qui leur est nécessaire. Pendant ce temps-là, les pensées prennent forme, certaines d'entre elles sont implicitement écartées, d'autres sont partagées parce qu'elles semblent plus convaincantes. Lorsqu'on choisit de procéder à une interprétation plausible, l'activité expérimentale – même lorsqu'elle est menée par un adulte – prend la forme d'une activité scientifique. Et en tant que telle, elle stimule la réflexion individuelle et le dialogue collectif, elle suggère des modèles causaux, elle conduit à imaginer des structures microscopiques responsables des comportements macroscopiques observés.

observer les détails pour généraliser l'expérience

Il semble donc important de faire en sorte que les enfants s'efforcent de trouver par eux-mêmes des explications aux petits détails d'un phénomène déjà connu dans ses grandes lignes. Si le contexte didactique éveille chez l'enfant le désir de mettre en jeu ses propres idées, l'angoisse et la peur de se tromper s'estompent. Si l'ambiance est calme, les multiples ressources intellectuelles des enfants convergent sur un but qui est à leur portée, et plus le détail à observer semble de peu d'importance, plus l'aptitude à expliquer devient importante. Pour commencer, il faut noter les multiples modalités selon lesquelles un phénomène général (en l'occurrence l'évaporation) se réalise et prend forme dans des situations diverses. Puis on peut établir une relation – par le biais d'un récit unique et plausible – entre les nombreux aspects observés, en veillant surtout à ce que l'explication ne contredise pas ce qui a été observé et ce qui est déjà considéré comme certain.

regarder pour savoir raconter ce qui se passe

L'observation attentive de différents cas sert justement à saisir les relations entre l'objet de la recherche et ce qui se passe tout autour, à déterminer le début de chaque transformation, à lier en un récit logique l'enchaînement des changements observés en remarquant que ce qui arrive avant modifie le contexte et conditionne ce qui arrivera après. Ainsi, les stratégies de la pensée temporelle (succession, durée, simultanéité...) peuvent se transformer en stratégies de la pensée causale (dans sa forme la plus simple) et, au niveau cognitif, on passe du ça arrive quand... à ça arrive si...

4.2. Le cycle de l'eau au cours élémentaire première année

les changements d'état...

Nous nous trouvons maintenant dans une autre école, une autre situation. L'enseignant a un problème : il veut faire comprendre aux enfants le cycle de l'eau et les différents changements d'état de l'eau elle-même. Pour commencer, les enfants ne savent pas ce que signifie le mot état (certains d'entre eux pensent aux glaciers se trouvant à la frontière

... pourquoi
ne pas valoriser
l'expérience ?

entre les États italien et français), mais ils ont une grande expérience de glaces qui fondent, de neige qui se transforme en eau, d'eau qui bout, de linge qui sèche, de sueur qui s'évapore. Il suffirait peut-être de réorganiser tous ces phénomènes connus et d'établir un lien logique entre eux, de trouver des ressemblances et des différences, de chercher et de définir les conditions dans lesquelles se manifestent des phénomènes analogues... et l'on peut aussi essayer d'élaborer un modèle d'eau qui, comme toutes les autres substances, a une structure "en particules", plus ou moins bien attachées entre elles. Les particules de l'eau se rapprochent et s'éloignent, s'unissent et se séparent plus facilement que d'autres : elles sont sensibles aux variations de la température, poussées à modifier leurs interactions par apport de chaleur... Il ne s'agirait donc pas d'expliquer des choses nouvelles, mais de rattacher de manière cohérente des phénomènes bien connus. Toutefois, l'enseignant veut "faire une expérimentation", celle canonique qui consiste à faire fondre de la glace dans une casserole, à faire chauffer l'eau jusqu'à ce qu'elle parvienne à ébullition, faire condenser la vapeur sur un couvercle froid... Du point de vue cognitif, cette activité peut représenter en tant que telle une expérience pour ceux qui n'ont jamais bien vu comment bout l'eau, ou devenir de manière heuristique une expérimentation si à travers elle on parvient à démontrer, par exemple, le rôle de l'énergie thermique dans la transformation ou si elle répond à des questions précises. Par exemple : comment se fait-il qu'à partir d'un certain moment, le même flux de chaleur ne fasse plus augmenter la température ? Dans notre cas (et malheureusement dans de nombreux cas semblables) les activités qui sont pompeusement appelées "expérimentations" débouchent uniquement sur des simples démonstrations de faits, parce qu'on omet d'en expliquer la signification heuristique et cognitive. Les enfants observent (sans toucher, parce qu'ils pourraient se faire mal) et voient des choses qui, à leur âge, ne sont pas tout à fait évidentes. Le simple fait de regarder est important pour se rendre compte personnellement de ce qui arrive, et enrichir de manière consciente sa propre expérience.

L'enseignant, cependant, veut conduire sa classe, à partir de l'évidence des faits, à visualiser mentalement le cycle de l'eau : les relations sont pour lui absolument évidentes, elles le sont beaucoup moins pour les enfants. Du reste, il est peu probable que ce qui est évident pour celui qui sait le soit aussi pour celui qui ne sait pas encore. En outre, voir les phénomènes qui arrivent "naturellement" dans la vie de tous les jours, c'est une chose, se servir de ces évidences pour élaborer un modèle abstrait de cycle de l'eau – totalement éloigné tant de l'expérience individuelle que de l'activité réalisée – en est une autre. Il faut savoir voir clairement dans quelle mesure l'expérimentation est comme la

en quoi
l'expérimentation
est-elle comme
la réalité ?

réalité, et dans quelle mesure, en revanche, elle s'en éloigne radicalement. Les relations nécessaires pour comprendre "quels éléments de l'expérimentation correspondent à quoi dans la réalité" ne sont pas très simples, même dans une situation aussi banale. Le lieu, le moment, les températures auxquelles se réalisent naturellement les différents phénomènes, les phases du cycle sont différents. Et puis dans la nature on peut constater la simultanéité, pas seulement la succession, par exemple entre fusion et évaporation... Pourquoi donc, si l'eau s'évapore (en bouillant) d'un petit pot situé sur un réchaud, faut-il penser que "la même chose" arrive dans les océans et la forêt amazonienne ?

penser par
stratégies

Apparaît la nécessité d'une habitude à élaborer, à différents niveaux, des stratégies de la pensée qui mènent à l'abstraction, la nécessité de recourir de manière habituelle à des stratégies de pensée analogique, tout en sachant que ce n'est qu'en imposant des analogies (en projetant le concret visible sur d'autres échelles... en d'autres périodes, d'autres lieux, avec d'autres conditions de température...) que l'expérience avec le petit pot peut mimer (représenter) ce qui, à l'échelle de la planète, se passe réellement .

l'eau qui bout
et le cycle
de l'eau :
le ciel est-il
comme un
couvercle ?

Les glaciers de montagne fondent, plus par frottement qu'à cause de la chaleur du soleil, l'eau des ruisseaux, des lacs et des mers, des forêts ou des prés ne se comporte pas comme l'eau du petit pot (la première ne bout pas, mais toutes deux s'évaporent) ; la "fumée" chaude qui sort de la casserole n'est pas comme les nuages chargés de pluie qui annoncent l'orage (mais dans les deux cas c'est de la vapeur d'eau) : le couvercle placé sur le petit pot n'est pas comme les hauts stratus froids de l'atmosphère (et pourtant, dans certaines conditions, la condensation a lieu suivant des modalités analogues).

certaines
généralisations
ne sont pas
comprises...

Une expérience d'un quart d'heure, proposée et exécutée par l'enseignant, peut-elle vraiment être généralisée à des échelles temporelle et spatiale aussi différentes au point d'évoquer la magnificence du phénomène naturel ? Dans le contexte de la classe, les enfants apprennent plutôt à répéter l'analogie suggérée par la maîtresse, ils ne se soucient pas de donner une signification personnelle à ce qu'ils ont vu et ils ne pensent même pas à l'éventualité d'être effectivement convaincus par cette démonstration (et l'esprit critique ?).

... mais on peut
au moins
bien regarder
"comment
l'eau bout"

Il serait plus naturel, dans un premier temps, que l'observation de l'eau qui bout se limite à aider les enfants à voir "comment" elle bout, à considérer son réchauffement progressif, à observer les mille détails qui se présentent toujours dans ces conditions. Faire quelque chose dans le but d'observer une transformation peut avoir une valeur d'expérimentation et conduire éventuellement à la détermination des variables – pas toujours faciles à mesurer ! – qui interviennent dans le phénomène. Parallèlement, on peut regarder avec attention ce qui arrive aux flaques d'eau

lorsqu'elles sèchent, aux feuilles qui se fanent et qui retrouvent de la vigueur dans l'eau... En d'autres termes, l'interprétation analogique ne peut fonctionner que lorsqu'elle se fonde de manière valable sur des bonnes connaissances phénoménologiques...

L'histoire du passage d'un état à l'autre ne vaut-elle que pour l'eau ou est-ce qu'elle constitue une règle générale de comportement de la matière ? L'objectif cognitif de l'enseignant qui propose l'expérience est, probablement, celui de démontrer une situation générale à travers l'analyse d'un cas particulier. Mais la généralisation ne peut être laissée au hasard, et encore moins aux enfants. Il est à ce titre utile de mettre en œuvre des stratégies de comparaison, et de regarder de manière expérimentale ce qui arrive, dans les mêmes conditions, à d'autres substances.

On peut comparer le comportement de l'eau avec celui de l'alcool (mais il est difficile d'en trouver à l'état solide) ; ou avec celui de l'huile (mais il est difficile de la voir s'évaporer) ; ou avec celui de la naphthaline (qui sublime souvent sans devenir liquide...). À ce moment-là, les stratégies de généralisation ne fonctionnent plus. Comment distinguer les substances dont les particules, au contact de la chaleur, changent d'état d'agrégation de celles qui, comme le papier, se limitent à se transformer chimiquement ? A-t-on jamais vu le passage de "l'état solide à l'état liquide" du carton, du bois, de l'étoffe... ou même du plastique ? Et cela vaut donc la peine pour un enseignant de se demander si l'eau a un comportement si emblématique qu'elle finit par représenter toutes les autres substances ou s'il faut trouver des modèles différents pour différents types de transformations.

Sans se soucier de tous ces problèmes, les enfants regardent ce qui se passe (chacun avec sa propre idée en tête), prennent des notes, se convainquent ou montrent qu'ils sont convaincus, mais il est difficile qu'ils retiennent sans comprendre. Ne pas s'exposer aux critiques et aux mauvais notes fait partie du contrat didactique. Même au niveau inconscient, tant que le malaise n'apparaît pas évident, chaque enfant tend à se comporter comme s'il avait tout compris.

Il est très difficile de comprendre quelles sont les véritables attentes de l'enseignant, quels sont les résultats qu'il pense obtenir à travers son expérimentation. Parfois, le rituel didactique est si profondément ancré qu'il est vraiment persuadé que les enfants parviennent à voir dans les faits ce qu'ils doivent y voir, ce qu'il veut qu'ils y voient. Ce n'est pas toujours le cas. Et il est difficile d'évaluer la distance (cognitive) entre les faits qui se produisent sous les yeux de tous et les interprétations qui, au contraire, sont suggérées ou imposées par les paroles.

Si lui-même n'avait pas la moindre idée de la signification de son expérimentation, serait-il vraiment en mesure de la trouver à partir de la simple observation ? Sa compétence

confronter et généraliser... ce n'est pas toujours possible

c'est pour cela qu'il faut davantage de modèles de référence

les enfants font semblant de comprendre...

... mais le professeur est prisonnier de ses attentes...

... et ne parvient pas à s'en rendre compte

et sa sensibilité devraient le conduire à se rendre compte de la signification effective de ses démonstrations, tout comme de la solidité des connaissances des enfants (les apparences ou les simples fiches de contrôle ne suffisent pas). Son activité de recherche, la confrontation avec les collègues qui ont certainement vécu des situations similaires, l'expérience de l'enseignement, devraient l'aider à comprendre ce qui manque au plan didactique, afin que l'activité proposée puisse effectivement déboucher sur l'élaboration d'une pensée scientifique.

4.3. Le corps humain au cours moyen deuxième année

L'étude du corps humain peut représenter un domaine de recherche didactique et de structuration cognitive permettant de comprendre dans quelle mesure des expériences ou des expérimentations simples peuvent stimuler l'imagination logique et activer, de manière cohérente, de multiples stratégies de pensée. Il est important pour les enfants de comprendre que le "corps humain" est aussi leur corps, mais, comment rapporter à soi ce que l'on apprend sur les livres ? Analysons brièvement les difficultés et quelques activités possibles dans le cadre d'un parcours d'interprétation d'une réalité complexe.

on grandit
parce qu'on
mange : les
transformations

On grandit parce qu'on mange. Combien faut-il travailler sur l'imaginaire pour comprendre que ce que nous mangeons peut se transformer en corps d'enfant ?

les bonnes et
les mauvaises
substances

La nourriture transformée passe dans l'intestin : les bonnes substances passent dans le sang, les mauvaises sont éliminées à travers les selles. Comment peut-il y avoir des éléments "mauvais" dans ce que nous mangeons ? Quand faudra-t-il déplacer notre attention du métabolisme global de l'organisme (pour lequel tout est bon) au métabolisme cellulaire (pour lequel ne sont bons notamment que certains produits de la transformation chimique de molécules complexes ?).

Et comment les bonnes substances passent-elles dans le sang ? Comment l'appareil circulatoire est-il relié à l'appareil digestif ?

un intestin se
divise en noms,
sans être divisé
en parties

L'intestin se divise en... En réalité, on donne des noms différents à des parties d'un seul tube dans lequel se déroulent les processus digestifs. Comment imaginer une continuité fonctionnelle ? (cf. la très riche littérature sur ce thème, à partir des travaux de A. Giordan).

un concept
important :
la perméabilité...

Il est nécessaire d'affronter le fonctionnement systémique de l'organisme et de trouver les liens et les relations physiologiques entre les différents appareils. D'un point de vue général, il faudra faire imaginer le passage probable de substances à travers des parois ou des membranes qui en apparence ne présentent pas de solutions de continuité. Du point de vue de la connaissance biologique, la perméabilité est

... essentielle
pour interpréter
les processus
physiologiques

peut-être l'un des concepts structurants, nécessaire pour interpréter tous les processus physiologiques. Du niveau macroscopique au niveau sub-cellulaire, les parois et les membranes servent à la fois à isoler et à mettre en communication chaque intérieur avec un extérieur, et les substances qui les traversent sont impliquées dans le fonctionnement coordonné de l'organisme.

Une multiplicité d'expériences, de démonstrations et d'expérimentations pourront constituer le support nécessaire permettant de donner une signification à une physiologie complexe, chacune avec ses limites et chacune devant donner lieu à une interprétation, une expansion, une généralisation, une abstraction.

On pourra faire une expérience en explorant un fragment d'intestin de bœuf ou le mésentère qui enveloppe l'intestin d'une poule, pour voir le riche réseau de vaisseaux sanguins qui entourent un tube intestinal à la paroi apparemment imperméable. Mais le passage de l'observation à l'interprétation est toujours problématique. Comment visualiser le passage des aliments dans le sang ?

Du visible à l'invisible

Une expérience emblématique : une pomme peut-elle passer à travers un mouchoir ? En la rapant ou en la hâchant dans une assiette... en essayant de toutes les manières possibles, seul le jus et les toutes petites particules passeront à travers la trame. Cela renvoie également aux activités sur les solutions, les mélanges de substances solubles et insolubles, hydrophiles ou hydrophobes, sur les différences entre les solvants, les différents comportements d'une même poudre dans l'eau, l'huile, le trichloréthylène... On peut généraliser sur le fait que ne passent, habituellement, que les substances en solution.

Pour trouver ce qui passe et ce qui ne passe pas à travers un filtre on peut essayer de faire du thé. C'est une expérience qui peut constituer une expérimentation simple. Les petites feuilles ne passent pas, mais avec de l'eau tiède, on voit sortir du filtre un tas de particules foncées. Et les trous du filtre sont encore moins évidents que ceux du mouchoir.

Faire du thé n'a peut-être pas grand chose à voir avec l'assimilation intestinale, mais certains enfants commencent à établir des relations.

– *Oui, le sachet de thé est comme l'intestin. Les substances mauvaises, ce sont les petites feuilles qui restent à l'intérieur et c'est le caca, la couleur marron, ce sont les bonnes substances qui passent dans le sang.*

Un camarade propose immédiatement un contre-exemple :

– *Pense aux pâtes : les bonnes substances restent à l'intérieur de la passoire et à travers les trous, ce sont les substances mauvaises qui passent, l'eau qui ne sert plus à rien.*

Enseignant : – *Mais alors, faut-il imaginer la paroi de l'intestin comme le sachet de thé qui fait passer les bonnes substances ou comme la passoire qui fait passer les mauvaises ?*

Le modèle commence à prendre forme : il peut y avoir des trous invisibles, des substances qui les traversent et d'autres qui ne passent pas.

Une expérimentation démonstrative peut conduire à des raisonnements analogiques et il est possible à présent de faire différentes expériences de dialyse.

Le tube de dialyse (une membrane semi-perméable) est comme l'intestin, ce qu'on y met à l'intérieur est comme la nourriture mangée et transformée, le liquide dans lequel le tube est plongé est comme le sang, dans lequel passent les particules traversant les parois.

de nouveaux
mots,
de nouvelles
idées : équilibre
et déséquilibre

On commence à se servir de mots tels que équilibre et déséquilibre, d'abord comme des évocations peu précises, puis avec une prise de conscience toujours plus grande. On découvre des analogies avec des situations matérielles, qui conduisent à des interprétations toujours plus plausibles. Quand les concentrations sont équilibrées, on ne s'aperçoit pas du passage entre extérieur et intérieur, quand les concentrations sont déséquilibrées, le passage des substances peut être démontré.

équilibres de
concentration

On parvient aux conclusions générales après de longues discussions et en imaginant des explications aptes à rendre compte de la situation. "Toutes les substances ne traversent pas la membrane, mais celles qui passent vont toujours de là où il y en a le plus à là où il y en a le moins".

le sens du flux
est imposé

Un même schéma d'interprétation, dynamique et non seulement descriptif, permet de visualiser les relations entre digestion et circulation, respiration et circulation, excrétion et circulation (P. Clément, 1991). En passant au niveau microscopique, on parvient au niveau cellulaire, où se trouve finalement la signification physiologique des activités complexes qui assurent la vie de l'organisme et de ses parties.

digestion,
respiration,
circulation,
excrétion

Ainsi, alimentées et oxygénées par le sang, les cellules vivantes grossissent, se divisent et... se multiplient : chacune peut en former deux... leur nombre croît rapidement, elles se spécialisent suivant des fonctions particulières... le corps grandit. Alors, dire qu'on grandit parce qu'on mange c'est vrai, mais ça ne suffit pas. Le modèle dynamique (fonctionnel) peut aider les enfants à élaborer des idées complexes, en suivant des processus inductifs, analogiques, logiques, causaux. La capacité de raisonner de cette manière est une composante essentielle de n'importe quelle activité scientifique.

de l'organisme à
ses cellules...
qui se multiplient
en se divisant

Pour compléter le modèle du fonctionnement du corps, il faut encore parler du rapport entre intérieur et extérieur, de la perception, du système nerveux... Les nouvelles connaissances que l'on va acquérir au fur et à mesure ne se fonderont pas cependant sur des démonstrations rituelles mais sur un échafaudage cognitif suffisamment solide pour les soutenir. En effet, comme l'écrivent J.-P. Astolfi et M. Develay (1989), la solution d'un problème complexe peut se développer uniquement à travers une succession d'activités qui

un modèle :
un échafaudage
à enrichir et
compléter

suivent des logiques différentes, et qui prennent une signification dans leur intégration réciproque.

4.4. Instruments et mesures

La recherche des variables qui décrivent ou qui conditionnent un phénomène conduit, presque inévitablement, au besoin de les mesurer, en passant des aspects qualitatifs aux aspects quantitatifs. Comme on le dit habituellement, la technologie fournit des prothèses perceptives à notre insensibilité physiologique, et chaque instrument est certainement plus sensible que nous aux différences de la variable qu'il est capable de mesurer, en transformant de manière cohérente sa valeur en chiffres. Grâce à quelques simples procédés techniques, les enfants apprennent à utiliser mètres, thermomètres et balances, en obtenant des lectures correctes et des chiffres exacts. Mais, habituellement, on se limite à utiliser les instruments pour mesurer... : leur fonctionnement demeure mystérieux (ou magique). Heureusement, il est rare qu'un enfant se demande pourquoi pour le mercure du thermomètre "avoir toujours plus chaud" se traduit par "se dilater toujours davantage" et comprenne alors que c'est pour ça que la colonne de mercure devient plus longue (sans pour autant devenir plus lourde). Les loupes agrandissent, et heureusement les enfants ne se posent pas de questions sur les "lois" de l'optique géométrique. Les balances pèsent, et on sait bien qu'ici c'est la force de gravité qui est en jeu... du moins tant qu'on ne commence pas à faire une grande confusion entre poids et masse.

quantifier
les variables :
les difficultés
de la mesure

Pour savoir comment fonctionne un instrument de mesure, il faudrait comprendre comment chaque prothèse perceptive répond numériquement de manière spécifique seulement à une des variables qui conditionnent une situation (les mètres ne s'occupent pas des variations des forces ou des températures). Il faudrait donc savoir suivre pas à pas, au fil des transductions, la variable que l'on veut mesurer. Il n'est pas facile d'imaginer par exemple que dans le thermomètre, l'augmentation de la température, est liée à une augmentation de l'agitation thermique des atomes et des molécules qui peut être visualisée par l'allongement correspondant de la colonne de mercure ou d'alcool ou que, à travers une autre correspondance, cet allongement (en millimètres mais lu en degrés) indique une variation de la température.

On lit des nombres sur des règles, des bols gradués, des compteurs kilométriques, sur des balances, des tachymètres, des indicateurs de fréquences des radios... des montres. Ce sont toujours les mêmes et ils indiquent des choses très différentes ; c'est pourquoi il est facile de confondre et de ne pas comprendre à quelle variable ils font référence (et pourquoi).

du nombre à la variable et au changement de la variable

Sans vouloir aller plus loin dans les mystères et le charme de la mesure, rappelons simplement ici l'abstraction nécessaire d'avoir pour penser à la variable qui se cache derrière le nombre indiqué ou pour pouvoir déduire, toujours à partir des chiffres, les modalités de ses variations. Avec les précautions nécessaires ces problèmes peuvent aussi être affrontés à l'école primaire, tout en sachant que des enfants plus âgés ne savent pas donner une signification concrète aux chiffres qu'ils relèvent avec une extrême précision et des instruments encore plus perfectionnés.

5. APPRENDRE À PENSER

une science qui n'est pas ostentation

Initier les enfants à la science directement dans les manuels peut induire des réactions de rejet (les mauvais souvenirs des adultes sur la façon dont ils ont appris à l'école des quantités de choses sont à ce titre un témoignage significatif). Il ne faudrait pas les pousser à employer des mots dont ils ne connaissent pas la signification et il ne faudrait pas que la science (construction de la pensée) devienne pour eux un savoir ostentatoire (une exhibition d'informations à la demande). En d'autres termes, ils devraient comprendre que pratiquer la science n'a pas pour objectif de satisfaire l'enseignant. La participation émotive, l'esprit de compétition dans le jeu cognitif, l'engagement vis-à-vis de la découverte possible, l'orgueil de la réussite... sont des éléments indispensables pour stimuler l'intérêt et la compréhension des phénomènes. Il ne s'agit plus de répéter les explications d'autrui, qui ne les concernent pas personnellement, mais de s'engager, avec sérieux, attention et gaieté, à trouver des idées qui résument véritablement les faits et qui assemblent, en les réorganisant, des connaissances différentes.

la connaissance est une émotion

Afin de rendre moins aride la connaissance scientifique, il faut donc offrir des occasions concrètes pour expérimenter non seulement comment se passent les choses, mais aussi le plaisir de penser, d'inventer de nouvelles possibilités, d'avoir des intuitions brillantes. Il ne suffit pas de postuler la nécessité d'un lien entre les aspects émotifs et les aspects cognitifs : il faut vraiment les intégrer. Bien que le terme d'"esprit modulaire" soit aujourd'hui à la mode, cela vaut la peine de rappeler l'extraordinaire ressemblance biologique entre les fonctionnements cérébraux qui génèrent des émotions et ceux qui génèrent la connaissance, et de rappeler la complexité des parcours qui, à l'intérieur de notre cerveau, associent les sensations, les perceptions, les informations et la mémoire. Il ne s'agit pas, même au plan physiologique, d'univers distincts (un simple cortex superposé à un hippocampe), mais de connexions qui s'activent simultanément en reliant différentes zones et en mettant en relation des systèmes cellulaires qui interagissent. C'est ce

les modes de fonctionnement du cerveau sont reliés entre eux

fonctionnement global qui lie de manière indissoluble les sensations internes et externes, agréables et désagréables, qui pousse à mettre en relation l'expérience, la mémoire et l'apprentissage et donne une valeur à la connaissance objective de la réalité.

...et dans un milieu agréable on apprend mieux

Nous savons tous que quand on comprend on se sent bien et quand on ne comprend pas, on se sent mal. Ce qu'on appelle la motivation naît alors également du fait que l'on se sente à l'aise dans un milieu cognitif adapté, dans lequel il n'est pas nécessaire d'affronter des situations trop difficiles ou d'affronter des obstacles disproportionnés par rapport à ses capacités. Le professionnalisme de l'enseignant joue donc dans la réalisation de ce climat. C'est à lui de percevoir dans quelle mesure le niveau de ses demandes ou de ses propositions s'adapte aux capacités cognitives des enfants qu'il a devant lui, en considérant la possibilité de revenir en arrière, de recommencer à zéro ou de poursuivre vers des objectifs plus élaborés que prévu.

6. PHÉNOMÈNES COMPLEXES ET EXPLICATIONS SIMPLES

adapter l'enseignement aux capacités d'apprentissage

Une éducation scientifique de base pourrait commencer par assembler des mots, des réflexions et des relations concernant des phénomènes à la portée des enfants et qui, si l'on ne s'y arrête pas, peuvent paraître banals. En ajustant entre eux des éléments d'expérience, de langage et de connaissance, on peut apprendre à raisonner sur des situations concrètes. Les faits arrivent, mais ne révèlent pas leur explication. C'est pourquoi les enfants doivent comprendre tout d'abord ce que signifie expliquer et ce que l'on attend d'une explication. L'enseignant doit essayer de rendre problématique ce qui apparemment ne l'est pas ; et ensemble on peut décider de ce qu'on peut regarder, par où commencer, ce qu'on prend pour acquis, ce qui est avéré ou ce qui ne l'est pas... ce que l'on essaie vraiment de faire. La science impose de poser de vraies questions, celles dont on ne connaît pas la réponse ; et des stratégies didactiques élémentaires imposent de ne pas donner des explications qui n'auraient pas été demandées, mais d'en faire naître le besoin.

une science à la mesure de l'enfant...

Dans cette approche, le point essentiel au plan méthodologique consiste à savoir travailler au niveau des enfants, en respectant leurs exigences cognitives et, dans le même temps, en les développant. Pour un enfant, il est important de se rendre compte que le monde, dans son état naturel, peut être problématique. Le besoin d'une explication n'est pas spontané : et seule l'interaction didactique avec un adulte qui stimule la réflexion peut ouvrir la voie à l'imagination cohérente, à l'interprétation scientifique. Bien que

... pour trouver
les idées qui sont
derrière les faits

n'étant pas en mesure de suivre dans sa totalité un raisonnement hypothético-déductif, les enfants de l'école élémentaire sont en général capables d'abstraction mais ils ne savent pas imaginer les idées qui se trouvent derrière les faits, pas plus qu'ils ne sont en mesure de les trouver dans l'austère langage scientifique qui en cache souvent le sens. Même les enfants plus grands (et de nombreuses recherches confirment cette attitude) ne parviennent pas à supposer que derrière les listes de phénomènes à étudier il puisse y avoir des élaborations de la pensée, ou que ces interprétations soient soutenues par des constructions mentales élaborées. Les idées apparaissent comme autant de supras-structures inutiles, pesantes, qui bloquent un apprentissage mnémonique utile et qu'il ne vaut pas la peine de produire par soi-même. Tout au plus s'agit-il d'une inutile philosophie de plus : des mots supplémentaires à mémoriser.

On ne peut avoir l'illusion que les travaux pratiques peuvent vraiment résoudre tous les problèmes, mais il est certain que si on les enrichit d'une réflexion métacognitive élémentaire, ils peuvent aider les enfants à bâtir des explications qui leur sont propres et à mettre en relation des faits concrets avec une réélaboration abstraite plausible.

constatations
et tautologies
pour
se familiariser
avec les
phénomènes

En développant une quelconque activité pratique, les enfants peuvent être conduits à se souvenir d'expériences similaires, à les raconter à leurs camarades ou à les différencier. La construction d'un patrimoine commun amplifie et précise le problème, et joue un rôle analogue à celui d'une recherche bibliographique pour un adulte. Au début, les découvertes, les constatations et les descriptions vont se combiner avec des explications évidemment tautologiques. Sous la direction de l'enseignant, on peut représenter, avec des mots ou des dessins, ce que l'on voit de ses propres yeux, et ce que l'on pense pouvoir arriver. Et chaque représentation contient, de manière plus ou moins implicite, les fondements de l'interprétation.

même ce qui
semble évident
peut susciter
des questions...

Des questions plus ou moins naïves pourront faire naître l'exigence d'affiner les explications qui ont déjà été données, pour sortir des tautologies ou de l'évidence, et de chercher des idées derrière les phénomènes. Le sucre se dissout dans l'eau. C'est un fait, et ce qui se passe est bien visible : qu'y a-t-il à expliquer ? Il y a des graines qui germent et d'autres qui ne germent pas. C'est un fait, on voit l'écorce qui éclate, la racine qui sort : qu'y a-t-il à expliquer ? Il suffit de commencer à parler ensemble pour comprendre que les choses sont loin d'être simples, que les modèles possibles s'opposent presque toujours, que pour en choisir un il faut regarder les faits encore plus attentivement. Il est plus complexe en revanche de rompre le cercle vicieux que l'on crée lorsqu'on essaie d'expliquer une chose que l'on ne comprend pas par une autre chose que l'on ne comprend pas. Par exemple, en mélangeant des lieux communs et des

phrases entendues à plusieurs reprises, il y a des enfants qui sont convaincus de pouvoir expliquer le fonctionnement du cerveau. Mais les tautologies dont ils se servent sont loin d'être convaincantes :

– *Oui, le cerveau marche... comme un ordinateur, il a les informations...*

Enseignant : – *D'accord, mais... à ton avis, comment ça marche un ordinateur ?*

– *Ben... comme le cerveau.*

Les façons de faire naître le besoin d'explications devraient être la préoccupation première de l'enseignant qui peut aussi se poser des questions : comment un phénomène évident peut-il devenir problématique ? Pourquoi certaines choses peuvent – doivent – être expliquées alors que pour d'autres on se limite à les constater ? Pourquoi certaines explications n'expliquent pas ? Quand peut-on se contenter d'une explication ?

... mais il y a des explications qu'in'expliquent pas

7. STRATÉGIES DE PENSÉE

Dans les exemples précédents, pour donner une signification aux expériences et les faire évoluer vers des interprétations organiques de la réalité, nous avons vu en action plusieurs stratégies cognitives, c'est-à-dire des manières de penser qui permettent d'affronter consciemment les problèmes émergeant des situations. Essayons ici de résumer celles qui nous semblent être les plus importantes, en vue d'aider les enseignants à les percevoir plus facilement dans les attitudes des élèves.

Comme nous l'avons vu, les simples observations et descriptions activent des stratégies de pensée temporelle qui portent à trouver dans les phénomènes des éléments de succession et de contemporanéité ou à confronter les durées des différents processus. Les stratégies de schématisation aident à voir comment toute expérimentation peut représenter de manière emblématique des processus beaucoup plus compliqués tandis que les stratégies qui relient le général au particulier permettent de l'interpréter comme l'évidence d'une théorie ou d'une explication globale. La dialectique entre induction et déduction se forme désormais à travers la confrontation réciproque de ce qui se passe sur deux niveaux de complexité si différents. En ce sens, les approches expérimentales bien menées stimulent des stratégies de pensée analogique, qui portent à éclaircir les liens entre des aspects de la réalité et les caractéristiques de leur reconstitution en laboratoire.

Dans le même temps, la recherche d'une explication stimule des stratégies de pensée causale. Dans l'ensemble, l'interprétation scientifique commence à s'articuler dans la succession des questions qui renvoient aux explications :

les différentes stratégies de pensée s'entrelacent

on imagine des causes grandes ou petites, immédiates ou à retardement, individuelles ou multiples

le développement logique des interprétations

il faut des indices pour comprendre comment se passent les choses et pour intervenir de manière appropriée

la recherche des causes et des corrélations stimule la pensée hypothétique...

“c’est vrai que cette chose arrive, comme nous l’avons vu et constaté, mais qu’est-ce qui la fait arriver ?” Parfois la relation de cause à effet est évidente, mais d’autres fois on reste déconcerté par des faits qui arrivent sans cause apparente (mais y en a-t-il vraiment ?). Il y a des causes singulières et des causes multiples, des causes infimes qui provoquent des phénomènes grandioses et des causes énormes qui produisent des effets minuscules ; et on peut réfléchir en classe – et pas seulement pour faire de la philosophie – sur la signification de ce que nous appelons cause.

La curiosité et l’envie de comprendre dissimulent la richesse des expériences qui permettent également aux enfants de choisir les explications les plus efficaces, de développer des interprétations en mettant en relation ce que l’on voit, ce que l’on pense et ce que l’on sait. Chaque phénomène se déploie dans un contexte particulier, et il est possible d’identifier les conditions qui influent, de différentes manières, sur son évolution. C’est sur cela que se fondent des stratégies d’analyse permettant de découvrir ce qui influe ou n’influe pas, à différents moments, sur ce que l’on est en train de regarder. En désarticulant les différents éléments de situations même complexes, les élèves plus grands pourront repérer certaines variables (extérieures et intérieures), et observer et mesurer la manière dont la variation contrôlée de variables extérieures influence la variation de variables intérieures...

Avec l’expérience, se développent des stratégies de raisonnement fondées sur des indices : il existe des signes, souvent imperceptibles, qui indiquent comment se passent les choses et comment on peut les modifier. On propose alors des interventions afin que les choses aillent mieux : selon ses projets et ses objectifs, pour les accélérer ou les ralentir... On agit de manière ciblée et on confronte les résultats obtenus... On trouve ce qui est nécessaire, ce qui est important, ce qui ne l’est pas ; et on recherche les conditions optimales (celles grâce auxquelles tout se passe bien) ou extrêmes (les limites au-delà desquelles le phénomène ne peut pas se passer), on observe comment, du fait d’une “catastrophe” dans la relation causale, il se passe quelque chose de radicalement différent de l’effet imaginé. Repérer une cause unique n’est presque jamais possible : il est important de voir comment plusieurs causes participent de manières différentes à la manifestation d’un phénomène donné.

Dans l’interprétation de phénomènes complexes, en effet, les stratégies de pensée causale sont confrontées aux différentes corrélations entre les variables, à la spécificité fonctionnelle de certains paramètres. Pour les compléter et les enrichir, il faut des stratégies de pensée hypothétique qui conduisent à imaginer l’éventualité de nouveaux développements : si... alors... ; si je fais... il arrive ; s’il arrive cela, il arrive aussi cela... ; si je veux que cela arrive... alors je dois faire comme ça.

...met en évidence des relations entre les variables...

... et mène à la pensée systémique

La causalité linéaire se déploie dans la recherche de corrélations ; la pensée s'exerce sur plusieurs dimensions, l'interprétation globale tient compte des interférences et des dépendances entre différentes variables... Des stratégies qui déterminent des causalités linéaires se développent dans ce que l'on considère comme des causalités circulaires mettant en évidence des rétroactions (feedback) positives et négatives, qui affrontent la complexité avec des stratégies de pensée systémique.

8. POUR CONCLURE : SCIENCE ET IMAGINATION LOGIQUE

un seul enseignant, une multiplicité de rôles

Les exemples et les considérations proposées montrent bien que la transformation conceptuelle d'une activité expérimentale dans le cadre d'une réflexion scientifique n'est ni le fruit du hasard ni un phénomène épisodique. Même dans les meilleures conditions (à savoir lorsque les élèves bénéficient de riches expériences et savent en parler en confrontant leurs idées) l'enseignant doit doser avec soin la séquence temporelle dans laquelle exercer les différentes fonctions : au fur et à mesure, il doit savoir en effet provoquer, guider, suggérer, orienter, faire semblant de ne pas entendre, réorganiser, solliciter... conclure. Il est important également qu'il sache effectuer un retour en arrière par rapport à ses connaissances jusqu'à se trouver sur un terrain commun avec ses élèves. Évidemment, il ne s'agit pas d'oublier les véritables interprétations scientifiques des faits mais d'essayer de regarder les histoires des phénomènes avec les yeux de ceux qui n'en connaissent pas l'épilogue.

l'imagination logique et la construction de modèles...

L'enseignant peut alors se permettre de proposer des activités de modélisation fondées sur l'imagination logique. La construction de modèles met au jour certaines connaissances (méta-connaissances) des élèves, mais elle est fondamentale pour stimuler des processus de réflexion hypothético-déductive. "Si la graine se gonfle dans l'eau, comment imagines-tu son enveloppe?" "Si quand on piétine une brique il en sort de la poudre, comment imagines-tu cette poudre dans la brique ?" Et ainsi de suite.

Il n'est pas toujours facile, pour un enseignant, d'accueillir avec attention et respect les efforts d'imagination des enfants, qui brisent les liens confortables des schématisations préconçues. Il faut accepter de nouveaux symboles pour la réalité que l'on essaie de connaître, comprendre les analogies et les métaphores qui décrivent des fonctionnements dont on ne voit pas les causes. La recherche des mécanismes mystérieux, des structures cachées nous conduit sur un terrain à la limite entre le logique et l'évident,

...pour
comprendre
ce qui ne peut
se voir

le magique et le cognitif. Cependant, lorsqu'ils sont conduits par un adulte à réfléchir sur ce qu'il est possible de comprendre, les enfants peuvent apprendre à relier les faits et les interprétations en trouvant dans l'invisible – tels de véritables scientifiques – les explications causales du visible. Les expérimentations, toutefois, peuvent servir précisément à éclairer l'invisible, à mettre en évidence les relations cachées. Et même si on veut que les enfants jouent aux scientifiques, il est souhaitable qu'ils sachent les imiter non seulement dans les processus d'expérimentation de routine, mais surtout dans la capacité d'invention et d'imagination, la richesse cognitive qui leur permet d'enquêter sur le monde de manière expérimentale.

Maria ARCÀ
Centro di studio per gli Acidi Nucleici del CNR
Università di Roma, Italie

BIBLIOGRAPHIE

- ALFIERI, F., ARCÀ, M., GUIDONI, P. (Eds.) (1995). *Il senso di fare scienza*. Turin : Bollati Boringhieri Ed.
- Aster* 7 (1988). *Modèles et modélisation*. Paris : INRP.
- Aster* 8 (1989). *Expérimenter, modéliser*. Paris : INRP.
- ASTOLFI, J.-P., DEVELAY, M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France.
- ASTOLFI, J.-P., PETERFALVI, B., VÉRIN, A. (1998). *Comment les enfants apprennent les sciences*. Paris : Retz.
- CLÉMENT, P. (1991). Sur la persistance d'une conception : la tuyauterie continue digestion-excrétion. *Aster*, 13, 133-155. Paris : INRP.
- GIORDAN, A. (Éd.) (1983), *L'élève et/ou les connaissances scientifiques*. Berne : Peter Lang.
- GIORDAN, A., MARTINAND, J.-L. (1988). État des recherches sur les conceptions des apprenants à propos de la biologie. *Annales de didactique des sciences*, 2.
- LATOURE, B. (1986). *Science in Action*. Mylton Keynes : Open University Press.
- OGBORN, J., KRESS, G., MARTINS, I., MCGILLICUDDY, K. (1996). *Explaining Science in the Classroom*. Mylton Keynes : Open University Press.
- POZO, J.I., GOMEZ-CRESPO, I. (1998) *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid : Morata.