

CONSTRUIRE DES MÉTHODES À L'ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE : LA SÉPARATION DE VARIABLES ET LA MODÉLISATION

Jean-Claude Genzling

Les méthodes de résolution de problèmes (nous entendons par là ce qui est commun dans la diversité des procédures de résolution), tout comme les concepts, ne peuvent être appréhendées efficacement par les élèves par un simple effort d'exposition de l'enseignant : elles doivent être construites par les élèves engagés dans des activités de recherches de solutions à des problèmes posés par des situations fort diverses.

Les problèmes que peuvent rencontrer les élèves de l'école élémentaire peuvent être classés en deux catégories :

*- les recherches de relations causales (une grandeur effet peut dépendre de plusieurs grandeurs causes). Le problème porte généralement sur l'**existence** d'une relation entre deux grandeurs. De tels problèmes conduisent les élèves à maîtriser peu à peu la méthode qui consiste à séparer les variables causes et à faire varier l'une d'entre elles, en fixant la valeur des autres ;*

- les recherches d'explications (autres que causales). Elles nécessitent la construction et l'utilisation de représentations (ou modèles) du réel.

*Dans les deux cas, la simple répétition d'activités ne suffit probablement pas à faire prendre conscience aux élèves de la méthode. Il semble qu'il soit nécessaire de provoquer un **retour** sur les procédures de résolution (à l'aide de documents témoins) pour en dégager les spécificités, et de **comparer** entre elles des procédures de résolution portant sur des problèmes différents. Les élèves (guidés par le maître) peuvent dans ce cas mettre en évidence ce qui est commun dans des situations qui peuvent être, quant à elles, très éloignées.*

les élèves doivent
construire les
méthodes de
résolution de
problèmes

Après avoir défini un modèle pédagogique qui donne à l'élève un rôle actif dans la **construction** de ses connaissances et de ses méthodes de travail ⁽¹⁾, et vérifié la validité de ce modèle en milieu scolaire (essentiellement à l'école élémentaire et au collège), les différentes équipes de recherche en sciences expérimentales de l'Institut National de Recherche Pédagogique (du moins les équipes école) se sont attachées à expliciter la genèse de certains concepts (énergie, écosystème...) et les structures qu'ils tissent avec d'autres concepts ⁽²⁾. On retiendra ici l'idée d'activités de structuration développée par J.-P. Astolfi ⁽³⁾. Leur

(1) Michel DEVELAY. "Evolution des recherches pédagogiques en sciences expérimentales". *Bulletin Aster*, 20. 1983.

(2) On pourra se reporter à "Eclairages sur l'énergie". *Aster*, 2. 1986, et à "Explorons l'écosystème". *Aster*, 3. 1986.

(3) Jean-Pierre ASTOLFI. "Présentation de la recherche sur les procédures d'apprentissage en sciences expérimentales". *Bulletin Aster*, 20. 1983. Jean-Pierre ASTOLFI et Anne COULIBALY. "Structuration : tentative de clarification". Document interne, ESCIEX, INRP, 1983.

cette construction impose à l'enseignant la programmation d'activités de structuration

la séparation des variables est une composante essentielle de l'expérimentation

l'importance d'une méta-réflexion portant sur les procédures de résolution de problèmes

la modélisation est, avec l'expérimentation, une composante fondamentale de la méthode expérimentale

fonction essentielle est la construction par les élèves d'un savoir cohérent en prenant en compte les acquis ponctuels obtenus à l'issue des activités de résolution de problèmes.

La recherche portant sur la formation des compétences méthodologiques est plus récente ⁽⁴⁾. Il ne faut cependant pas en déduire que l'acquisition des méthodes a été systématiquement négligée au cours des recherches antérieures. On pourra par exemple relire le texte de Marcel Paulin ⁽⁵⁾ qui fixe très clairement les différentes étapes de la construction et de la maîtrise de la méthode que nous appelons la séparation des variables. La recherche actuelle de l'équipe école élémentaire porte plus particulièrement sur la construction et l'utilisation par les élèves de modèles dont la fonction est à ce niveau essentiellement explicative.

Les méthodes se construisent à l'occasion des procédures que les enfants mettent en œuvre lors des activités de résolution de problèmes. Elles ne peuvent être dégagées sans une **intention** et donc des interventions spécifiques du maître. Un **retour** sur le "comment on a fait pour..." est généralement nécessaire ; autrement dit la construction des méthodes demande de véritables moments structurants qui peuvent se situer :

- soit lors d'une activité de résolution de problèmes, lorsque la procédure de vérification mène à des contradictions ; c'est le cas lorsque l'expérimentation conduit à des résultats qui s'excluent logiquement,

- soit encore lors d'une **séquence autonome** programmée spécialement à cet effet. Une telle séquence est une séquence de structuration (ce terme désigne généralement des séquences dont le but est la généralisation de relations construites lors des activités de résolution de problèmes).

Nous nous proposons d'examiner ci-dessous la mise en œuvre de deux méthodes dont chacune revêt une grande importance :

- **la séparation des variables (au cours de l'expérimentation)** qui permet aux élèves d'établir l'**existence** de relations entre différentes grandeurs,

- **la modélisation** qui permet aux élèves de construire ou d'utiliser des représentations dont le pouvoir explicatif (à l'école) est fondamental.

Quel que soit le cas de figure, la fonction des moments structurants envisagés ci-dessus est d'amener les élèves à prendre conscience de la méthode et de mieux la maîtriser, en provoquant une **réflexion sur leurs propres démarches**, ou stratégies cognitives : c'est un travail de métacognition.

(4) *Compétences méthodologiques en sciences expérimentales, Document 1*. Publication interne, ESCIEX, INRP, 1986.

(5) Marcel PAULIN. "Comment les élèves sont-ils conduits à séparer les variables dans des activités scientifiques scolaires ?" in : *Les démarches scientifiques expérimentales : théorie et pratique*. Actes des 1eres journées sur l'éducation de Chamonix. Paris. Université Paris VII, Didactique des disciplines. 1979.

1. LA SÉPARATION DES VARIABLES

1.1. Un effet peut avoir plusieurs causes

une grandeur
effet peut
dépendre de
plusieurs
grandeurs cause

Le besoin d'explication, le désir d'agir sur un phénomène amènent les élèves à dégager des causes ou variables possibles. *"Les explications causales sont les explications par excellence, celles qui satisfont l'enfant à l'exclusion de toute autre. Quand on met les enfants en face d'une évidence expérimentale (par exemple : les corps plongés dans l'eau deviennent plus légers) ils ne sont satisfaits et capables d'assimiler et de manier la relation introduite dans l'énoncé, que lorsqu'on a répondu au "pourquoi" qu'ils posent aussitôt... Or ce pourquoi signifie à peu près généralement : par quelle cause ?"* ⁽⁶⁾. Ainsi lorsque des élèves découvrent que les développements de plusieurs vélos sont différents, ils s'engagent spontanément dans des activités de comparaison qui, si elles sont discrètement guidées par le maître, leur permettront de recenser un ensemble de causes possibles qui sont toutes susceptibles d'expliquer les différences observées. Il va de soi que cette recherche de variables est particulièrement efficace si les élèves ont préalablement repéré les éléments appartenant à la chaîne cinématique d'un vélo et établi la fonction (rôle du plateau, de la chaîne, du pignon...) de chacun de ces éléments.

Le rôle du maître est ici important car les élèves doivent prendre conscience qu'un **effet donné peut avoir plusieurs causes**. Cette prise de conscience est favorisée par la confrontation de leurs opinions. Elle est confirmée lorsqu'ils constatent, après vérification, que plusieurs des hypothèses avancées sont effectivement reliées à l'effet. On peut donc modifier celui-ci en agissant sur plusieurs variables. Un problème **pratique** (par exemple : évaporer de l'eau très vite) peut donc admettre plusieurs solutions ou encore on peut rechercher la meilleure solution. Le maître devra insister sur ce point lors du moment structurant.

1.2. La construction d'une procédure de vérification

établir l'existence
d'une relation
entre deux
grandeurs

Un effet (ou la grandeur effet) peut dépendre de plusieurs variables (ou grandeurs causes). Comment vérifier si l'une d'entre elles **est une cause** ? Autrement dit comment vérifier si la grandeur effet (le développement du vélo, la vitesse d'évaporation...) **est reliée** à la grandeur cause (le nombre de dents du pignon, la longueur de la chaîne, l'étendue de la surface libre du liquide...) ?

Aucun raisonnement préétabli ne permet de répondre à cette question. Au contraire **ce raisonnement ne peut être cons-**

(6) Francis HALBWACHS. "La physique du maître entre la physique du physicien et la physique de l'élève". *Revue française de pédagogie*, 33, 1975.

l'importance de l'erreur dans la prise de conscience de la méthode

truit qu'à partir des essais et des erreurs des élèves. Il est tentant pour un maître de limiter l'autonomie des élèves, de réduire leur droit à l'erreur et de leur suggérer la "bonne manière" de vérifier. Dans une perspective constructiviste, cela serait une faute pédagogique : l'erreur est ici féconde et formatrice, et elle permet justement de prendre conscience de la méthode.

savoir comparer

Dans la mesure où les élèves ont l'**habitude de comparer** (les activités de comparaison doivent être privilégiées dès la petite section de maternelle) ils proposeront des procédures de vérification susceptibles de répondre au problème posé (elles contiennent toujours l'idée de comparer deux situations qui diffèrent par une ou plusieurs qualités...). Les élèves savent par ailleurs qu'une proposition (un résultat, une conclusion...) ne peut pas à la fois être vraie et fausse (connaissance empirique du principe du "tiers exclu" : une proposition et la négation de cette proposition ne peuvent être vraies simultanément et une proposition est vraie ou elle est fausse). Si donc deux groupes, vérifiant la même hypothèse, obtiennent des résultats contradictoires, alors l'un au moins des deux groupes a commis une erreur dans la conception ou dans la réalisation de sa procédure de vérification.

l'importance de la réflexion a posteriori sur les procédures de résolution

La recherche de cette erreur, sur le plan expérimental et si nécessaire sur le plan du **raisonnement**, exige un retour sur ce qui a été fait. Il faut comparer la démarche des deux groupes. Il s'agit là d'un moment assis, d'un moment de **méta-réflexion**, qui doit mener à la prise de conscience de la méthode par **l'ensemble du groupe classe**. Cette réflexion sur le passé ne peut aboutir que si elle peut s'appuyer sur des documents produits par les différents groupes. La trace écrite qui nous paraît la mieux adaptée à cet effet est le tableau de comparaison qui donne une description (en termes d'actions ou d'opérations) aussi complète que possible de l'expérience.

l'importance des tableaux de comparaison

L'exemple ⁽⁷⁾ reproduit page ci-contre met en évidence le **rôle des tableaux** : ils gardent la trace de l'action, ils sont la mémoire du groupe. Lorsque la méthode est encore mal maîtrisée (au CE 2 et au CM 1) il est souhaitable que les enfants fassent apparaître **la suite ordonnée des opérations (actions) effectuées au cours de l'expérience**. Ils retracent alors la démarche du groupe avec ses exigences : les valeurs de l'ensemble des variables, sauf celle de l'une d'entre elles, doivent être fixées. Lorsque cette condition n'est pas réalisée on ne peut conclure. Inversement si on suit scrupuleusement la méthode et si la conclusion est contraire aux prévisions, alors on peut suspecter l'existence d'une variable cachée.

(7) Extrait de : *Activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire. 3 : Initiation physique et technologique*. Paris, INRP, coll. Recherches Pédagogiques, 74, 1975, pages 77 et 78.

“...les enfants répartis en deux groupes cherchent à imaginer une expérience capable de prouver que l'évaporation se fait plus vite à chaud... Les prévisions ne sont vérifiées que pour le premier groupe... On (le groupe classe) cherche une explication à cette contradiction : la maîtresse intervient pour guider la comparaison en faisant chercher ce qui est pareil, ce qui est différent dans chaque groupe d'abord, puis d'un groupe à l'autre.

On facilite la comparaison en l'organisant sous la forme d'un tableau : on reprend les opérations depuis le début pour faire chaque tableau.

	Groupe 1		Groupe 2	
	Pot 1	Pot 2	Casserole	Pot en verre
On a mis	de l'eau	de l'eau	de l'eau	de l'eau
On en a pris	2 cuillerées	2 cuillerées	2 cuillerées	2 cuillerées
On l'a mis dans	un pot en verre	un pot tout pareil	une casserole	un pot en verre
On l'a mis sur	le bureau	le radiateur	le bureau	le radiateur
L'eau a disparu après :	15 min	10 min	5 min	10 min
	L'eau s'évapore plus vite sur le radiateur		L'eau s'évapore plus vite sur le bureau	

Une lecture comparative des deux tableaux met en évidence :

- un seul changement pour le groupe 1 : la température.

- deux changements pour le groupe 2 : la température et la nature du récipient.

Les élèves prennent conscience que l'expérience du groupe 2 ne permet pas de conclure car "on ne sait pas si c'est la température ou le récipient qui fait changer le résultat".

le problème des variables liées

Dans la pratique il est parfois difficile de ne faire varier qu'une seule variable. Reprenons l'exemple de l'évaporation : si nous prenons deux récipients de même nature (même substance), de forme cylindrique mais de section différente, et si nous versons dans ces récipients la même quantité d'eau, **la hauteur** d'eau va être différente dans chacun de ces récipients. Cette variable n'apparaît guère dans les tableaux car elle ne correspond pas à une opération élémentaire de la procédure. Or les élèves, pour peu qu'ils tentent d'interpréter les résultats, y sont très sensibles : *"c'est d'abord la première couche d'eau qui s'en va puis la deuxième..."* disent-ils, et le nombre de couches dépend de la hauteur. Les élèves peuvent penser à juste titre que deux variables ont changé. Cette difficulté, si elle se présente (il s'agit du problème des variables liées), ne peut être dépassée (dans ce cas précis) que si on établit que la vitesse d'évaporation ne

dépend pas de la quantité d'eau contenue dans le récipient (supposé cylindrique). La quantité d'eau peut donc varier, ce qui permet de choisir des hauteurs égales...

Cette courte discussion met l'accent sur un autre aspect de la méthode : une variable **reconnue comme non pertinente** peut être supprimée dans les tableaux de comparaison et lors de l'expérimentation elle peut prendre n'importe quelle valeur. Une telle maîtrise de la méthode est difficile à atteindre au CM.

1.3. La généralisation de la méthode

faire apparaître si possible la suite logique des opérations effectuées

Le moment structurant d'une activité de résolution de problèmes devrait permettre aux élèves de prendre conscience de la méthode qui a permis de répondre au problème posé. L'outil privilégié de cette prise de conscience est le tableau de comparaison qui doit faire apparaître (chaque fois que cela est possible) la suite ordonnée des opérations qui, prises globalement, constituent la procédure. Ce type de tableau est une mémoire et dans ce cas précis il permet de reconstruire la procédure.

Pour certains problèmes, cette suite ordonnée d'opérations est quelconque, c'est-à-dire que l'ordre dans lequel on fixe les valeurs des variables n'est pas imposé par une suite logique d'actions se déroulant dans le temps. Il en est ainsi du problème du développement du vélo. Si l'on veut savoir si celui-ci dépend du nombre de dents du pignon, on prend un vélo muni de plusieurs pignons et on mesure le développement pour au moins deux pignons différents (les autres facteurs sont nécessairement fixés).

la prise de conscience de la méthode et sa généralisation sont favorisées par la comparaison

Sur le plan de l'apprentissage de la méthode, ce cas apparaît comme différent du cas de la vitesse d'évaporation ; la méthode est cependant la même. Pour favoriser cette prise de conscience, un maître peut programmer des **séquences spécifiques** qui amènent les élèves à comparer les démarches mises en oeuvre au cours d'activités différentes : il s'agit ici de véritables **séquences de structuration** dont la fonction est de généraliser une méthode.

Nous donnons ci-dessous en exemple quelques extraits d'une telle séquence conduite dans un CM1 : outre une consolidation et une généralisation de la méthode, cette séquence a permis au maître de faire le point avec les enfants avant de programmer de nouveaux sujets d'études. Elle comporte deux phases bien distinctes : une lecture successive de tableaux de comparaison suivie par une lecture comparée de tels tableaux.

- Le maître demande aux élèves de lire un premier tableau (fig 1)

Est-ce que la laine chauffe ?		
ce qui peut être important \ expériences	1	2
le récipient	en aluminium	un récipient pareil
le support (du récipient)	une plaque de polystyrène	la même plaque
l'endroit où est posé le récipient	sur une table	sur la même table
la quantité d'eau (dans le récipient)	cinq verres d'eau	la même quantité d'eau
la température de l'eau au début	20° C < t < 21° C (celle de la salle de classe)	la même température 20° C < t < 21° C
présence de laine	oui	non
température de l'eau après une demi-heure	20° C < t < 21° C	20° C < t < 21° C

Conclusion : la laine ne chauffe pas.

Le maître : *Comment avons-nous fait pour répondre à la question : est-ce que la laine chauffe ?*

Des élèves : *On a fait deux expériences (deux montages : un avec laine et l'autre sans laine).*

Le maître : *Pourquoi avons-nous fait deux expériences ?*

Emilie : *..Si on ne faisait pas une expérience sans la laine, on ne verrait pas la différence.*

Emilie semble avoir bien compris le rôle du montage témoin.

Le maître : *..Qu'est-ce qui changeait dans les deux expériences ?*

Sophie : *Dans une il y avait de la laine et pas dans l'autre.*

Le maître : *Y a-t-il encore autre chose qui change ?*

Les élèves : *Non .*

Le maître : *Est-ce que le tableau dit aussi qu'il n'y a qu'une seule chose qui change ?*

Les élèves : *Oui .*

Bertrand : *Quand il y a présence de laine il y a oui et non et pour le reste il y a toujours la même chose .*

Le maître : *..On pourrait écrire comment on a fait pour répondre à la question ...*

Figure 1

Le groupe classe retient la phrase suivante : pour savoir si la laine chauffe, on a comparé deux expériences où tout était pareil sauf la laine. (Une demi-heure après le début de l'expérience, les élèves ont lu et comparé les températures de l'eau contenue dans les deux récipients ; initialement la température de l'eau était celle de la salle de classe). Cette formulation est trop concise car elle n'explique pas que la réponse à la question posée est fondée sur la comparaison, au bout d'un certain temps, des températures de l'eau contenue dans les deux récipients.

- Le maître demande aux élèves de lire un deuxième tableau (fig 2)

Est-ce que le développement dépend du nombre de dents du pédalier ?		
ce qui peut être	vélos	
		1
		2
roues		une certaine grandeur
chaîne		la même grandeur
pignon		une certaine longueur
		la même longueur
pédalier		un certain nombre de dents
		le même nombre de dents
mesure du développement en m.		un grand nombre de dents
		un petit nombre de dents
conclusion		

Figure 2

En comparant différents vélos le groupe classe a établi que le développement pouvait dépendre de la grandeur des roues, de la longueur de la chaîne, du nombre de dents du pignon et du nombre de dents du plateau. Les élèves n'ont pas encore mesuré le développement des vélos décrits dans le tableau de comparaison.

Le maître : *Comment faut-il faire pour répondre à la question ?*
 Anne : *Il faut compter le nombre de dents du pédalier*

Cette élève n'est pas la seule à répondre ainsi et si une autre élève n'est pas "tellement d'accord" c'est seulement parce

qu'elle estime que ce comptage " n'est pas très évident car il y a beaucoup de dents ". De toute évidence tous les élèves de la classe n'ont pas saisi la méthode à mettre en œuvre dans ce cas particulier.

La procédure qui a servi à répondre à la question portant sur le rôle de la laine, n'est pas transférée spontanément ici. Cela n'est pas en contradiction avec le fait que ces mêmes élèves aient compris que le développement pouvait dépendre de la longueur de la chaîne, de la grosseur du pignon,... La courte discussion qui suit, permet à Anne (et aux autres élèves qui pensent comme elle) de prendre conscience qu'il ne suffit pas de compter le nombre de dents des pédales pour répondre à la question posée.

Marianne : *Il faut comparer le résultat de chaque expérience . Au maître qui lui demande de préciser ce qu'elle entend par expérience, elle répond : il faut comparer le développement des deux vélos*

Le maître : *Et si les développements sont égaux, quelle sera la conclusion ?*

Un élève : *Le nombre de dents du pédalier n'est pas important*

- Le maître demande aux élèves de lire un troisième tableau (fig 3)

ce qui peut être important \ vélos	1	2
roues	une certaine grandeur	la même grandeur
chaîne	une grande longueur	une petite longueur
pignon	grand nombre de dents	petit nombre de dents
pédalier	un certain nombre de dents	le même nombre de dents
mesure du développement en m.		
conclusion		

Figure 3

Ce tableau incomplet (la question à laquelle il permet de répondre n'est pas indiquée) comporte une ambiguïté (deux variables qui varient). Proposé par le maître, il n'a pas été établi avec les élèves en prévision d'une expérimentation.

Le maître : *Cherchez à quelle question ce tableau permet de répondre.*
 Un seul élève répond : *Est-ce que le développement dépend de la longueur de la chaîne ?*
 Le maître : *Êtes-vous d'accord ou pas d'accord ?*
 Adeline : *Je ne suis pas tellement d'accord car là où il y a chaîne il y a grande longueur et petite longueur et là où il y a pignon il y a grand nombre de dents et petit nombre de dents.*
 Au maître qui lui demande de préciser sa pensée, elle ajoute :
Si on pense à l'autre tableau il faudrait seulement changer la longueur de la chaîne.

Adeline a probablement compris la méthode ; le doute qui subsiste ne peut être levé car Sophie propose une nouvelle question qui, de toute évidence, jette le trouble dans les esprits : "est-ce que le développement dépend de la longueur de la chaîne et du nombre de dents du pignon ?" Plusieurs élèves pensent que c'est là, la question qui correspond au tableau. Le maître rappelle alors aux élèves comment ils ont procédé pour répondre à la question relative à la laine. Adeline comprend alors l'erreur de Sophie : "il faudrait faire deux tableaux". Elle a saisi que cette question correspond à deux questions indépendantes, auxquelles il faut répondre séparément.

Le maître : *Qu'est-ce que tu proposes de changer à celui-là ? (le tableau de la figure 3)*
 Adeline : *À "pignon" on pourrait enlever "grand nombre de dents" et "petit nombre de dents" et on pourrait mettre "le même nombre de dents".*
 Le maître : *Et qui a une idée concernant la question ?*
 C'est Sophie qui répond
 Sophie : *Est-ce que le développement dépend de la longueur de la chaîne ?*

Les élèves semblent d'accord avec Sophie.

Le maître : *Pourquoi êtes-vous d'accord avec Sophie ?*
 Jean-Philippe : *Parce qu'on a barré "grand nombre de dents" et "petit nombre de dent".*

Le groupe classe reprend le même travail en fixant la variable "longueur de la chaîne". 18 élèves sur 22 trouvent alors la question qui correspond à ce nouveau tableau.

- Le maître propose aux élèves de lire deux tableaux simultanément

Il s'agit des tableaux des figures (1) et (2).

Dans l'esprit du maître cette comparaison devrait permettre aux élèves de prendre conscience que **la méthode est la même** dans les deux cas.

Adeline : *C' est les mêmes tableaux .*

Le maître demande aux élèves de rechercher (travail par équipe) les ressemblances et les différences dans les deux tableaux. Les résultats de cette recherche sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Ressemblances	Différences
<ul style="list-style-type: none"> - une seule chose change - on recherche ce qui peut être important - on compare deux expériences 	<ul style="list-style-type: none"> - les questions ne sont pas les mêmes

Comme on peut le voir, ce tableau contient les **caractères essentiels de la méthode**. La séquence se termine par la recherche d'une formulation écrite. Voici celle retenue par le groupe classe : *"pour répondre à certaines questions (pour chercher ce qui est important pour expliquer...), on compare deux expériences dans lesquelles on change une seule chose."*

On peut penser que la majorité des élèves a compris qu'on répond aux deux problèmes en opérant de la même façon, c'est un début de généralisation.

2. LA MODÉLISATION ⁽⁸⁾

la modélisation est une méthode de résolution de problèmes

Un modèle est une **représentation systémique et hypothétique** d'une partie de la réalité, délimitée par la pensée **en fonction d'un problème à résoudre**. A l'école élémentaire, ce problème est généralement une recherche d'explication, plus rarement une tentative de prévision. Cette partie de la réalité ou **système** peut être un objet (la terre, un objet technique : une diode, un transistor...) ou un ensemble d'objets ayant des propriétés et liés entre eux par des relations (par exemple le système solaire).

2.1. Un modèle ne décrit pas la réalité telle qu'elle est

Il la décrit telle qu'elle pourrait être. Cette réalité peut être non visible (par exemple un mécanisme ou un organe), très complexe (le nombre d'éléments est très grand) ou encore inaccessible globalement à l'observation (par exemple un système astronomique). Les éléments du système peuvent aussi être non détectables par les sens (les particules d'eau). Bref, contraire-

(8) On trouvera des études de cas dans "Modèles et modélisation". Aster, 7, 1988.

un modèle que l'on construit décrit une situation en fonction d'un problème à résoudre

ment au sens commun, il est généralement impossible de décrire complètement et totalement une réalité et ceci d'autant plus que les relations entre ses éléments (interactions) échappent par leur nature même aux techniques d'observation (sa description ne peut être réduite à la description du perçu). La seule façon de l'appréhender est donc de construire une représentation ne rendant compte que de certains aspects de cette réalité. On ne conserve dans cette représentation que les caractères qui nous paraissent indispensables pour répondre aux problèmes posés par le réel ; problèmes qu'il faut résoudre pour mieux le connaître. Ainsi, si on suppose qu'un gaz est formé de particules toutes identiques, il n'est pas nécessaire de s'interroger sur leur forme si on veut expliquer et calculer la pression que ce gaz exerce sur les parois du récipient qui le contient. De même si on veut savoir pourquoi la lune change de forme, il n'est pas nécessaire de s'interroger sur l'origine de la lumière émise par le soleil; cette dernière question est cependant fondamentale si on cherche à déterminer la durée de vie de celui-ci. La construction d'un modèle implique donc un choix parmi les descriptions possibles de la réalité ; ce choix est guidé par le type de problème à résoudre. La représentation retenue, d'une part ne la décrit pas complètement, d'autre part est partiellement hypothétique dans la mesure où une grande partie de cette réalité échappe à nos instruments d'observation.⁽⁹⁾

2.2. La modélisation est une activité intellectuelle complexe

Elle est tout d'abord la **construction** d'un modèle ou l'**appropriation** d'un modèle proposé par le maître (ou par un document) ou encore la **mobilisation** d'un modèle déjà construit.

Elle est ensuite la **conduite d'un raisonnement** : un modèle est un objet **pour penser**. Représentation d'un système dont il ne décrit que certains aspects (choisis en fonction d'un problème à résoudre), le modèle s'exprime par un ensemble de relations qui permettent d'**inférer** de nouvelles relations connues (fonction explicative du modèle) ou inconnues (fonction prédictive du modèle).

2.3. La prise de conscience de la notion de modèle et de la modélisation

il s'exprime à l'aide de signifiants divers

Un modèle représente certains aspects (généralement mal connus ou inconnus) d'un système réel. Il peut s'exprimer à l'aide de signifiants (ou codes symboliques) très divers : ma-

(9) Jean-Claude GENZLING, in : Jean-Pierre ASTOLFI, Anne-Marie DROUIN, (coord.). *La modélisation à l'école élémentaire*. Rapport de la recherche coopérative sur programme LIREST-INRP. Document multigraphié. 1990.

quettes, mimes, dessins, schémas, représentations graphiques, relations mathématiques... Lorsque le signifiant présente un fort pouvoir figuratif (par exemple une maquette) il y a risque de transfert des propriétés du modèle au phénomène réel. C'est généralement le cas pour les systèmes astronomiques (système solaire...) et leurs "modèles maquettes".

un système réel
peut être
représenté par
des modèles
différents

Un système réel donné peut être représenté par différents modèles : ainsi le refroidissement d'un liquide chaud peut être interprété par un modèle substantialiste (l'échange de chaleur avec l'extérieur transite par une substance intermédiaire) ou par un modèle mécaniste. De même le système **terre - soleil** peut être représenté soit par un modèle géocentrique soit par un modèle héliocentrique. Inversement un même modèle (par exemple un modèle particulaire) peut représenter des systèmes réels différents .

un même modèle
peut représenter
des réalités
différentes

La modélisation, définie comme la construction (ou la mobilisation) et l'utilisation de modèles, permet d'interpréter et de prévoir. Elle est donc aussi une méthode de résolution de problèmes, qui sont essentiellement des demandes d'explications à l'école élémentaire. Le modèle n'est pas lui même l'explication : il permet de l'établir ; autrement dit, pour l'atteindre il faut raisonner.

Les élèves ne peuvent établir spontanément les caractères des modèles et de la modélisation que nous avons évoqués ci-dessus. Une activité de structuration est nécessaire. Une telle activité n'est évidemment possible que si plusieurs activités de modélisation ont été menées préalablement. Le maître amènera les élèves à réfléchir sur la manière dont ils ont résolu un certain nombre de problèmes au cours de ces activités. Nous donnons ci-dessous à titre d'exemple de larges extraits de la transcription d'une telle séquence. (10)

(10) Jean-Claude GENZLING et Daniel RIBER. *La modélisation à l'école élémentaire*. Document interne, ESCIEX, INRP, 1988.

Le maître a inscrit au tableau les énoncés (notés Q1, ..., Q5), de cinq problèmes que le groupe classe a résolus au cours de l'année :

Q1 : explique la dissolution du sucre dans l'eau.

Q2 : explique la disparition de l'eau dans un récipient.

Q3 : explique pourquoi un conducteur s'échauffe quand un courant le traverse.

Q4 : explique pourquoi les jours et les nuits se succèdent.

Q5 : explique pourquoi la durée des jours et des nuits n'est pas la même toute l'année.

Au mur sont affichés des ensembles de phrases définissant quatre modèles (notés M1, ..., M4) permettant de répondre aux cinq questions précédentes. Il s'agit des versions définitives des phrases, car elles ont souvent été remodelées lors des séquences précédentes.

M1 : - on imagine que dans un morceau de sucre il y a des particules identiques.

- on imagine que les particules sont immobiles.

- on imagine que les particules s'attirent.

M2 : - on imagine que l'eau est formée de particules identiques.

- on imagine que ces particules sont constamment agitées.

- on imagine que si on chauffe le liquide, les particules sont plus agitées.

M3 : - on imagine que dans les métaux il y a des particules identiques (électrons) qui peuvent se déplacer et d'autres particules identiques qui sont immobiles (ions).

- on imagine que la pile provoque le déplacement des électrons dans un seul sens.

- on imagine que dans le conducteur les ions résistent au déplacement des électrons.

M4 : - on imagine que le soleil est immobile.

- on imagine que la terre tourne régulièrement autour d'un axe passant par les pôles.

- on imagine que la direction de l'axe reste fixe.

- on imagine que la terre tourne autour du soleil en un an.

Les élèves ont répondu à la question Q5 à l'aide du modèle M4 et d'un modèle géocentrique dont le texte figure dans leur cahier de sciences. Les différentes phrases définissant ces modèles sont également représentées à l'aide de schémas. Rappelons que pour répondre à la question Q4, les élèves avaient construit quatre modèles différents qui rendaient tous compte du phénomène étudié. C'est à l'issue de la résolution du problème 5 qu'un seul modèle a été retenu.

- Le maître veut faire prendre conscience aux élèves de la méthode mise en œuvre pour répondre aux questions 1 à 5

Le maître :	<i>Comment avons-nous fait pour répondre à ces questions ? ... Pierre-Henri ?</i>
Pierre-Henri :	<i>Dans la deuxième phrase par exemple, on a imaginé que dans l'eau il y a des molécules.</i>
Le maître :	<i>Oui tu donnes un exemple, on a imaginé que dans l'eau il y a des molécules, enfin c'est un peu mal dit ce que tu dis ; l'eau est formée de molécules.</i>
Jérôme :	<i>Dans certains cas on a fait des expériences.</i>
Le maître :	<i>On a fait des expériences ?</i>
Jérôme :	<i>Dans d'autres on a raisonné.</i>
Le maître :	<i>Explique dans quels cas on a fait des expériences.</i>
Jérôme :	<i>Dans : explique la disparition de l'eau dans un récipient.</i>
Le maître :	<i>Avons-nous fait des expériences pour répondre à cette question ?</i>
Jérôme :	<i>Non.</i>
Le maître :	<i>Il faut que ce soit bien clair ! Avons-nous fait des expériences pour répondre à cette question ?</i>
Des élèves :	<i>Oui ! ...Non !</i>
Le maître :	<i>Oui ou non, et on justifie la réponse.... Caroline ?</i>
Caroline :	<i>Oui.</i>
Le maître :	<i>Pourquoi ?</i>
Caroline :	<i>On a pris des poids et on a pesé la masse de l'eau.</i>
Le maître :	<i>Attention Caroline, tu n'as pas écouté ma question ; Est-ce qu'on a fait des expériences pour répondre à ces questions ? Est-ce que l'expérience dont tu viens de parler où l'on a pesé l'eau a été faite pour répondre à ces questions-là ?</i>
Jérôme :	<i>C'était pour savoir si ça disparaissait.</i>
Le maître :	<i>Ah bon ! je parle de ces questions aujourd'hui, est-ce qu'à une de ces phrases (il s'agit des questions Q1,...Q5) on a répondu par une expérience ?</i>
Des élèves :	<i>Non.</i>

Les expériences dont parle Jérôme sont celles qui ont permis de mettre le phénomène d'évaporation en évidence : les élèves ont pesé pendant quelques jours, toujours à la même heure des récipients de formes variées, fabriqués avec des substances différentes, qui contenaient initialement la même quantité de liquide.

Pour atteindre le but fixé à la séquence (mettre en évidence que la modélisation est une méthode de travail différente de l'expérimentation), il est nécessaire que tous les élèves soient convaincus que ce ne sont pas ces expériences qui ont permis de répondre à la question : que devient l'eau qui s'évapore ?

Claire-Marie : *Non , on a répondu avec des phrases, on n'a pas répondu avec des expériences.*

Le maître : *On a répondu avec des phrases ? Quelles sortes de phrases ?*

Un élève : *Des phrases qu'on a complétées avec des schémas .*

Le maître : *C'est tout à fait juste ce que tu dis ! Mais qu'est-ce que c'était comme sortes de phrases ?*

Cyril : *Des explications possibles.*

Le maître : *Des explications possibles ; des choses qu'on imagine comme dirait Pierre-Henri.*

Un élève : *Aussi des suppositions.*

Le maître : *Des suppositions ; donc à chacune de ces cinq questions on a répondu par des phrases, c'est juste, et ces phrases vous l'avez vu sont accrochées là au mur.*

Il existe donc des questions scientifiques auxquelles on répond non pas en expérimentant mais à l'aide de phrases qui sont "des explications" possibles.

- Les ensembles de phrases M1..... M4 définissent des modèles qui aident à répondre aux questions posées

Le maître : *Bon voilà un groupe de phrases, un ensemble de phrases qu'on peut aussi compléter par des schémas. Je n'ai pas mis les schémas au mur ; vous les avez dans votre classeur ; est-ce que quelqu'un peut nous relire un autre groupe de phrases permettant de répondre à une question? ... Caroline ?*

Caroline lit l'ensemble de phrases M3.

Le maître : *Voilà déjà deux groupes de phrases différents ; avant de relire les autres, je voudrais quand même vous dire une chose : ces ensembles de phrases ont un nom, un nom que vous ne connaissez peut-être pas ; un tel ensemble s'appelle un modèle (le mot est écrit au tableau). Caroline a lu un modèle.*

Après avoir introduit le mot modèle, le maître cherche à dégager la fonction explicative d'un modèle.

Le maître :	<i>Mais est-ce que chacun de ces modèles est la réponse à une de ces questions-là ? Je reprends la question du sucre : explique la dissolution du sucre dans l'eau ; est-ce que le modèle que quelqu'un a lu il y a quelques instants est la réponse à cette question ?.... Silence.</i>
Camille :	<i>Moi, je crois plutôt que c'est une réponse indirecte.</i>
Le maître :	<i>Pourquoi indirecte ? explique-toi.</i>
Camille :	<i>Parce qu'on ne répond pas tout à fait à la question ; on répond à une autre question.</i>
Pierre-Henri :	<i>On répond de quoi le sucre est fait.</i>
Claire-Marie :	<i>Mais on ne dit pas pourquoi, on n'explique pas.</i>
Claire :	<i>ces phrases nous aident à faire la réponse.</i>
Le maître :	<i>ces phrases nous aident à faire la réponse, c'est pourquoi nous avons été satisfaits. C'est vrai que cet ensemble de phrases, ce modèle nous permet de trouver la réponse, mais ce n'est pas la réponse ; ces phrases là nous permettent de répondre à la question.... Est-ce valable pour les autres aussi ?</i>
Un élève :	<i>Oui.</i>
Le maître :	<i>On prend le cas : explique pourquoi les jours et les nuits se succèdent. Est-ce qu'on a la réponse là haut ?</i>
Des élèves :	<i>Non.</i>
Le maître :	<i>Nicolas ?</i>
Nicolas :	<i>Non.</i>
Le maître :	<i>Mais quel est le modèle qui permet de répondre ? Tu nous relis les phrases ?</i>

Nicolas lit les phrases définissant le modèle M4. Le maître rappelle à ce moment que, lors de la résolution du problème 4, le groupe classe avait imaginé quatre modèles, et que trois de ces modèles avaient été éliminés au cours de la séquence ayant pour objet la résolution du problème 5.

Jusqu'à présent le groupe classe a dégagé deux idées importantes caractérisant la modélisation :

- on n'a pas répondu à certains problèmes (scientifiques) à l'aide d'expériences ;
- on peut répondre à ces problèmes en utilisant un (ou plusieurs) modèle(s). Un modèle n'est pas en lui-même la réponse au problème.

La prise de conscience d'un certain nombre de propriétés de ces modèles s'impose maintenant. Pour cette raison le maître tente de **rendre explicites les points communs des différents modèles** construits par le groupe classe.

Le maître :	<i>" Je voudrais maintenant que vous réfléchissiez aux points communs qu'il peut y avoir entre les quatre modèles " .</i>
-------------	---

Les élèves notent leurs réflexions sur une feuille.

• **Une même proposition peut appartenir à plusieurs modèles**

Pierre-Henri : *Les modèles 1 et 2 se ressemblent car tous les deux parlent de molécules.*

Le maître : *Est-ce juste ?*

Un élève : *Oui, le modèle 1 parle de molécules de sucre et le modèle 2 de molécules d'eau.*

Claire-Marie : *Mais le modèle 3 parle de particules ; on peut aussi dire que les modèles 1, 2, 3 parlent de particules.*

Le maître : *On est tout à fait d'accord, mais Pierre-Henri a dit que les deux premiers parlaient de molécules ; toi tu ajoutes que dans les trois premiers modèles on parle de particules.*

• **Un modèle présente un caractère hypothétique**

Nicolas : *Dans les quatre modèles on suppose quelque chose.*

Le maître : *C'est vrai, on suppose quelque chose, quel est le mot qui dit qu'on suppose ?*

Nicolas : *Peut-être.*

Le maître : *Il y a soit peut-être, soit ?*

Un élève : *On imagine.*

Le maître : *Donc ce sont toujours des suppositions comme tu dis.*

• **Un modèle représente un système**

Le maître : *... Mais puisque tu parles d'ensembles de phrases, relis donc le dernier, cet ensemble qu'est-ce qu'il décrit ? Il parle de quoi ? vous devez le savoir ; on en a parlé au planétarium.*

Un élève : *Le système solaire.*

Le maître : *Oui ces phrases décrivent le système solaire, mais est-ce qu'on ne pourrait pas dire que les trois autres modèles ne décrivent pas aussi une espèce de système ?*

Un élève : *Oui*

Le maître : *Ce serait quel système pour le premier ?*

Jérôme : *Le système du sucre*

Le maître : *Le deuxième ?*

Un élève : *Le système eau*

Le maître : *Et ici ?*

Un élève : *Le système électricité*

Le maître : *Ah non !*

Un élève : *Le système métal*

Le maître : *Métal, sucre, eau et système solaire ; donc on pourrait dire que chaque modèle décrit un système, voilà encore un point commun.*

Il est évident que des élèves de l'école élémentaire ne peuvent concevoir ce qu'est un système au sens du physicien (rappelons qu'un système est décrit par un ensemble de grandeurs physiques). Mais au delà des mots, il est important qu'ils saisissent qu'un **modèle représente une partie de la réalité** (un morceau de sucre, de l'eau contenue dans un récipient,...).

- **Des modèles semblables permettent de résoudre des problèmes différents**

Le maître : *N'y a-t-il pas deux modèles qui se ressemblent plus étroitement que d'autres parmi ces quatre là ?*
 Un élève : *Oui.*
 Pierre-Henri : *C'est le premier et le deuxième.*
 Le maître : *Pourquoi ?*
 Pierre-Henri : *Parce que ce sont des systèmes de molécules.*
 Le maître : *Oui ce sont des systèmes auxquels on a réfléchi à l'aide de molécules et ces molécules sont comment ?*
 Pierre-Henri : *Identiques.*
 Le maître : *Identiques pour chacun des deux systèmes.*
 Un élève : *Immobiles ou ...*
 Le maître : *Elles peuvent être immobiles, se déplacer et s'attirer, donc ce sont vraiment deux systèmes qui se ressemblent.*

- **Un même système peut être représenté par des modèles différents ou encore un même problème peut être résolu à l'aide de modèles différents**

Le maître attire l'attention des élèves sur la question Q4.
 Le maître : *Comment on a répondu à cette question ? Marie-Claire ?*
 Marie-Claire : *On a répondu en expliquant un système.*
 Claire : *On a donné quatre explications possibles.*
 Le maître : *Au lieu de dire quatre explications possibles ?*
 Un élève : *Quatre modèles.*
 Le maître : *Donc pour une question, on avait quatre modèles et parmi ces quatre modèles est-ce qu'il y en avait un qui était farfelu ?*
 Jérôme : *Non.*
 Le maître : *Oui, les quatre modèles permettaient de répondre à la question et c'est seulement pour répondre à une autre question qu'on en a abandonné certains, mais pour répondre à cette question nous avons trouvé quatre modèles.*

Le maître revient alors au point déjà développé en début de séance : la modélisation est une méthode de travail.

- Le maître : *Puisque tu parles de répondre, comment peut-on répondre à un problème en science ?*
- Claire-Marie : *On imagine un modèle.*
- Un élève : *Une maquette.*
- Pierre : *Des expériences.*
- Un élève : *Des schémas.*
- Le maître : *Oui mais ceux-ci font suite aux expériences.*
- Claire : *Se documenter.*
- Le maître : *Qui connaît encore une autre façon, par exemple quand on sort ?*
- Un élève : *On peut encore observer.*
- Le maître : *Donc on a trouvé une nouvelle façon de répondre à un problème en sciences : c'est d'imaginer un modèle.*

A ce moment-là (qui pourrait être la fin de la séquence), Pierre fait une remarque importante.

- Pierre : *Alors on imagine que dans le morceau de sucre il y a des molécules identiques ; on pourrait aussi dire qu'il y a des molécules qui ne s'attirent pas.*
- Le maître : *Je vois ce que tu veux dire ! Tu dis quelque chose d'intéressant ; tu veux dire qu'on pourrait imaginer à la limite n'importe quoi.*
- Pierre : *Oui.*
- Le maître : *Mais attention, est-ce que nous avons écrit n'importe quoi là ?*
- Un élève : *Non.*
- Le maître : *Je reviens toujours à l'astronomie, on a découvert que pour répondre à la cinquième question, on ne pouvait plus imaginer n'importe quoi... On avait quatre modèles pour commencer et tout à coup on a vu qu'on ne pouvait pas garder les quatre. Ceci veut bien dire qu'on ne peut pas imaginer n'importe quoi et pourquoi on n'a pas pu garder les quatre ? Claire ?*
- Claire : *On a posé une question et les quatre modèles étaient possibles et l'on a posé l'autre question et ils n'étaient plus possibles .*
- Le maître : *Oui.*
- Claire : *Et on a posé l'autre (question) et ils n'étaient plus possibles.*
- Le maître : *Pourquoi n'étaient-ils plus possibles ? Qu'est-ce qui nous a permis de les éliminer ?*
- Un élève : *On a fait des expériences (cet élève fait référence à des simulations à l'aide d'une maquette).*
- Le maître : *Oh non on n'a pas fait beaucoup d'expériences.*

.../...

.../...

Claire-Marie : *C'est l'histoire de Foucault, c'est lui qui a fait une expérience pour expliquer que la terre tournait .*

Le maître : *Là on est d'accord, cette expérience a permis d'en éliminer deux et pourquoi avons nous éliminé le troisième ? Avons-nous fait une expérience ? ...*

Claire-Marie : *Non, on a vu une photo et on a dit que l'axe (de la terre) était dirigé vers l'étoile polaire.*

Le maître : *Est-ce une expérience ?*

Un élève : *C'est une observation.*

Le maître : *Donc finalement on l'a éliminé grâce à quoi ?*

Un élève : *À une observation.*

Le maître : *Parce qu'on l'a comparé à une représentation de la réalité ; parce qu'il y en a qui correspondent à la réalité et d'autres qui ne correspondent pas à la réalité et dans ce cas qu'est-ce qu'on a fait ?*

Un élève : *On les a éliminés.*

De telles activités de structuration devraient aider les élèves à prendre conscience :

- de l'**idée de modèle** en tant que représentation d'une réalité qui fait problème. Le caractère hypothétique de cette représentation apparaît dans le langage (nous imaginons, nous supposons, ...).
- de la **modélisation** conçue comme une nouvelle méthode de travail impliquant à la fois la construction ou la mobilisation d'un modèle et son utilisation (on raisonne à partir des propositions fondant le modèle) pour établir la réponse au problème posé.
- de ce qu'un même système peut être représenté par plusieurs modèles. Un modèle peut être éliminé au cours d'une nouvelle activité de résolution de problème.

EN CONCLUSION

La construction des méthodes ne peut relever du hasard et il est vain d'espérer qu'elle puisse se faire sans séquences spécifiques. De telles séquences engagent nécessairement les élèves dans une réflexion portant sur les procédures qu'ils ont mises en œuvre dans différentes activités de résolution de problèmes (recherches de causes, recherches d'explication...). Elles demandent de prendre du recul par rapport aux activités particulières pour rechercher **les points communs** que présentent ces différentes procédures. Elles amènent les élèves à comparer des traces écrites (tableaux de comparaison, signifiants de modèles...) dont chacune décrit le chemin suivi qui a permis de trouver la réponse.

la construction de méthodes particulières

qu'il sera
nécessaire
d'articuler
ultérieurement

Elles mettent alors en évidence que pour certains problèmes, ce sont toujours les mêmes opérations de pensée qui permettent d'aboutir. De telles opérations définissent une méthode.

Nous n'avons envisagé ici que des méthodes particulières : la séparation des variables (l'expérimentation) et la modélisation. Une étape ultérieure serait de les articuler, tant il est vrai qu'une démarche de modélisation ne saurait être indépendante de l'expérimentation.

Jean-Claude GENZLING
Ecole Normale de Colmar