

CONCEPTION DE SEQUENCES D'APPRENTISSAGE : MODELES PARTICULAIRES

Martine MEHEUT, LDPES, Université Denis Diderot, France

Introduction

Enseigner de premières notions sur la structure atomique de la matière dès les premières années de l'enseignement secondaire (voire avant) apparaît aujourd'hui incontournable. Sans doute peut-on relier cet état de fait à l'impact croissant dans la vie quotidienne de technologies liées à ces théories (électronique, production d'énergie nucléaire par exemple) et à la diffusion par les médias d'un vocabulaire et d'images les concernant.

Dans cette entreprise, le caractère "concret" des modèles en jeu ne doit pas faire négliger les aspects théoriques qui y sont associés. En effet, des enquêtes visant à évaluer de tels enseignements et des travaux de recherche (Dow & al., 1978 ; Novick & Nussbaum, 1978 ; Pfundt, 1981 ; Méheut, 1982 ; Brook & al., 1984) mettent en évidence des difficultés :

- refus de l'existence du vide,
- dénégation de l'invariance des atomes, affectation aux atomes des propriétés observables.

Ces difficultés peuvent être mises en relation avec certains traits spécifiques du développement historique des modèles de structure de la matière. Ainsi, il apparaît que l'atomisme s'est développé à partir d'une conviction philosophique plutôt que d'observations empiriques, celle de l'immutabilité de la matière à travers ses transformations et de son unité sous la diversité. A cette conviction est associée une défiance à l'égard des témoignages des sens, une affirmation du caractère caché mais rationnel de la réalité (Kubbinga, 1983 ; Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991 ; Pullman 1995). La matière peut être colorée, fluide, malléable, compressible, combustible, etc. Les atomes ne sont dotés que d'une forme et de dimensions invariables, d'un mouvement permanent, ils ne peuvent que se heurter et s'agréger :

"Les atomes n'ont aucune autre qualité phénoménale en dehors de la pesanteur, de la grandeur, de la forme (...). Car toute qualité change, les atomes, par contre, ne subissent aucun changement (...)" ou encore *"Ils ne possèdent rien de la nature changeante ; ils ont des masses et des formes propres, qui sont nécessairement permanentes."* (Épicure, cité par Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991).

C'est bien une difficulté à accepter de tels "arbitraires" que semblent traduire certaines "erreurs" repérées par les chercheurs en didactique. N'oublions pas à quelles objections ces prises de position se sont heurtées, tant dans les débuts de l'atomisme qu'à différents moments de son développement. Donnons en simplement pour écho ces propos d'Ostwald, à la veille de l'acceptation de l'atomisme par la communauté scientifique internationale :

"Partout on répète, en manière d'axiome, que seule la mécanique des atomes peut donner la clef du monde physique. Matière et mouvement, tels sont les deux concepts auxquels on ramène en dernière analyse les phénomènes naturels les plus complexes (...) D'ordinaire, on ne prend pas garde à quel point cette manière de voir, si répandue, est tout hypothétique, tout métaphysique." ou encore *"Alors, dira-t-on, s'il faut renoncer aux atomes, à la mécanique, quelle image de la réalité nous restera-t-il ? Mais on n'a besoin d'aucune image, d'aucun symbole. (...) Etablir les rapports entre des réalités, c'est à dire des grandeurs tangibles, mesurables (...) voilà la tâche de la science et la science ne l'a pas remplie quand elle se paie d'une image plus ou moins hypothétique."* (Ostwald, cité par Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991).

Et ce qui apparaît comme une réponse de Boltzmann, mettant en avant le caractère d'instrument de pensée de l'atomisme, justifié davantage a posteriori par ses potentialités de description unifiée et de prévision de la réalité qu'a priori, par un caractère certain, dénué d'arbitraire ou d'hypothèse :

"Et construire les images destinées à la représentation d'une série de faits de telle manière qu'elles permettent de prédire le déroulement d'autres phénomènes semblables, c'est bien le premier objectif de toute science exacte (...). Les images pourront être modifiées et complétées de sorte qu'elles suffisent à la description des anciens et des nouveaux phénomènes. (...) Pour terminer, je n'hésiterai pas à soutenir, avec certaines réserves toutefois, qu'il est de la nature représentative même de l'image de contenir certains éléments arbitraires et qu'il est à la rigueur inévitable de dépasser les faits observés dès que l'on s'apprête à conclure sur un seul fait supplémentaire." (Boltzman, cité par Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991)

Les séquences d'enseignement que nous présentons ci-après visent à mettre en jeu ces caractères spécifiques des modèles atomistes :

- leur caractère d'abord plus rationnel qu'empirique, d'instrument de pensée plutôt que de réalité observable ;

- leur caractère mécanique, rendant facile leur "concrétisation".

La perspective est celle d'un développement de modèles comme instruments d'unification puis de prévision de phénomènes physiques, les modèles devant se préciser progressivement, en relation avec les questions. Cette approche prend en compte le caractère plutôt conjectural, a priori, et non empirique de l'immutabilité de la matière ; elle diffère en cela des démarches dans lesquelles il est attendu que les élèves s'appuient sur l'observation de phénomènes pour conclure à la nature particulière de la matière (Nussbaum & Novick, 1982 ; Johnston, 1990).

Un modèle unificateur dans le domaine des transformations physiques

Caractérisation du modèle

Champ de référence et fonctions du modèle

Dans une première séquence, les activités proposées aux élèves consistent à interpréter des transformations physiques de la matière (compression d'un gaz, mélange de gaz par diffusion, changement d'état) en termes de changements de répartition de particules immuables, de forme et de dimensions invariables. Les modèles ainsi élaborés sont encore très rudimentaires ; ils permettent une interprétation unifiée de la conservation de la matière entre état initial et état final des transformations étudiées. Sont ainsi mis en jeu la dissociation entre espace et matière, l'existence du vide et l'immutabilité des particules. Nous attendons également que les élèves envisagent un mouvement permanent et pluridirectionnel des particules pour expliquer le mélange par diffusion de deux gaz.

"Concrétisation" du modèle

Les élèves sont guidés dans ces activités d'interprétation par des tâches de production et de discussion de représentations iconiques (petits dessins). Ce mode de représentation possède des limites, du fait de son caractère statique ; il laisse par contre à l'élève une grande liberté dans le choix des signifiants. Ceci fait apparaître la diversité des représentations possibles et permet de faire émerger les variables du modèle pertinentes pour l'interprétation du phénomène, par une discussion du caractère signifiant ou non des différents aspects des représentations produites par les élèves. On trouvera en annexe quelques exemples de travaux demandés aux élèves.

Conduite de l'expérimentation didactique

Nous avons expérimenté cette séquence deux années successives, auprès d'environ 300 élèves (11 classes) de troisième année de l'enseignement secondaire (classe de quatrième, 13-14 ans). Cette expérimentation (6 séances d'une heure et demie) a été menée dans le cadre des horaires "normaux" d'enseignement de la physique et dans des classes d'effectifs "normaux". Les réunions fréquentes avec les collègues enseignants participant à l'expérimentation ont permis de mettre au point avec eux un protocole précis tenant compte des possibilités des élèves et des conditions de fonctionnement de l'institution scolaire.

Des traces écrites des activités des élèves ont été recueillies dans toutes les classes. Dans trois classes, les interventions de l'enseignant et les discussions de plusieurs groupes d'élèves ont fait l'objet d'enregistrement au magnétophone. Après la séquence, nous avons évalué, par des questionnaires écrits, différents aspects de l'appropriation et de l'utilisation du modèle.

Quelques résultats

L'invariance des particules

Nous avons choisi d'imposer cette invariance comme contrainte guidant l'élaboration du modèle. Cette contrainte est en général bien acceptée par les élèves qui réagissent vivement lorsqu'elle est transgressée.

Au cours de la séquence, les élèves ont représenté des substances différentes par des particules de forme différente. Les réponses aux questionnaires finaux montrent que cette signification est établie par une forte majorité des élèves (environ 80%). Ils montrent également que, après cette séquence, une faible proportion d'élèves (environ 10%) proposent encore d'interpréter l'augmentation du volume lors d'une dilatation (phénomène non étudié au cours de la séquence) par un gonflement des particules ; plus de la moitié (environ 60%) l'interprètent bien comme une augmentation de distances entre particules.

Dissociation espace-matière

Cette dissociation se traduit par l'existence du vide et la variabilité des distances interparticulaires ; elle permet de séparer les grandeurs masse et volume. Ceci apparaît chez une forte proportion des élèves lors de l'interprétation de la compression d'un échantillon de gaz. Cette distinction intervient ensuite dans l'explication de la plus ou moins grande compressibilité des gaz, liquides, solides mais aussi de la miscibilité des gaz et des liquides.

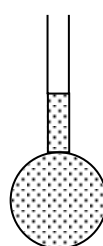
Il semble cependant que certains élèves aient eu quelque réticence à envisager une étendue sans matière. En effet, pour modéliser un gaz, ils représentent des particules jointives, sans espace interstitiel (4%), ou des particules superposées à un fond continu (7%). Un peu plus tard, pour modéliser un solide, ils s'appuient sur les propriétés d'incompressibilité, de cohésion, de non miscibilité des solides pour refuser l'existence de tels espaces vides (15%).

Afin d'évaluer dans quelle mesure la séquence a permis une meilleure dissociation des grandeurs masse et volume, nous pouvons comparer les réponses (voir figure 1), avant et après la séquence, à des questions relatives à des phénomènes de dilatation (phénomènes non étudiés au cours de la séquence). Celles-ci font apparaître une nette progression dans la dissociation des grandeurs masse et volume ; après la séquence, un tiers des élèves utilisent uniquement une argumentation particulière pour justifier la conservation de la masse malgré l'augmentation de volume.

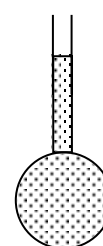
Quelqu'un a versé de l'eau dans un ballon et l'a pesé ; il obtient 157g. Quand il chauffe le ballon avec ses mains, le niveau de l'eau a monté. Il a pesé alors le ballon, qu'est ce qu'il a obtenu ?

- plus de 157g
- moins de 157g
- 157g

Avant
157g



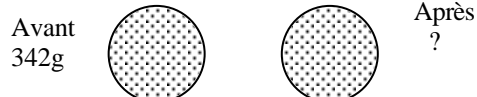
Après
?



O Je ne sais pas

Quelqu'un a pesé une boule de cuivre ; il obtient 342g.
Quand il chauffe cette boule de cuivre elle devient plus grosse.
Il l'a pesé, qu'est ce qu'il a obtenu ?

- O plus de 342g
O moins de 342g
O 342g
O Je ne sais pas



Expliquez votre réponse

.....

.....

Masse	Dilatation de l'eau		Dilatation du cuivre	
	Avant (N=113)	Après (N=151)	Avant (N=113)	Après (N=164)
augmente	19%	4%	28%	7%
diminue	8%	1%	9%	1%
ne varie pas	68%	93%	59%	91%
Pas de réponse	5%	2%	4%	1%

Figure 1: Un modèle unifié pour les transformations physique

Conservation de la masse pendant une processus de dilatation ; l'évolution des réponses des élèves

Agitation

Nous attendions que les élèves envisagent un mouvement permanent et pluridirectionnel des particules pour expliquer le mélange par diffusion de deux gaz. Ils ont été fort peu nombreux à répondre à cette attente (moins de 1%). Certains (23%) ont évoqué une possibilité de déplacement des particules sans spécifier les conditions de réalisation de ce mouvement.

Discussion

Ainsi nos élèves ont-ils travaillé à la modélisation de transformations physiques en termes de particules immuables. Cette première étape de modélisation ne rend compte que d'aspects fort limités de ces transformations. Elle a néanmoins donné l'occasion aux élèves de discuter des nécessaires compléments à la conjecture initiale : existence du vide, variabilité des distances et de la répartition des particules. Il apparait clairement, au vu des données recueillies (Chomat & al., 1988 ; Méheut & Chomat, 1990a ,1990b) que les aspects cinétiques, dynamiques et

thermodynamiques nécessaires à des modélisations plus performantes doivent faire l'objet d'apprentissages mieux spécifiés.

Un modèle prédictif dans le domaine des propriétés thermoélastiques des gaz

Caractérisation du modèle

"Concrétisation" du modèle

Afin de mettre en jeu le caractère d'analogie mécanique de modèles cinétiques, nous avons utilisé un logiciel de simulation. Ce programme génère des images d'entités se déplaçant dans un cadre rectangulaire (voir figure 2).

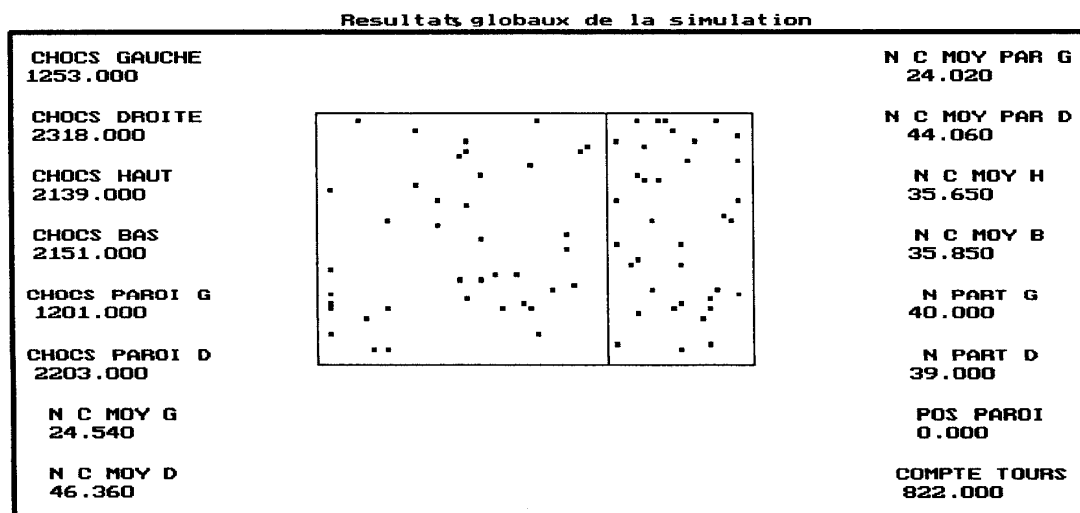


Figure 2 : Un modèle prédictif pour les propriétés thermoélastiques des gaz
"Concrétisation" du modèle; une copie d'écran

Les règles de déplacement des entités dérivent de la théorie cinétique des gaz, moyennant des procédures de discrétisation des variables (position et vitesse en particulier) (Chomat & al., 1990). L'utilisateur peut choisir les dimensions du cadre ; il peut aussi le diviser en deux compartiments par un trait dont il choisit la position. Ce trait peut, sur option, se déplacer en relation avec les chocs des particules. L'utilisateur peut demander l'affichage des valeurs des paramètres de la simulation en cours et les valeurs de différentes variables :

- nombre de chocs sur une paroi (ou par unité de longueur de paroi), pour une durée de simulation donnée ;
- lorsque la paroi est mobile, position de la paroi à un instant donné, position moyenne de la paroi pour une durée de simulation donnée.

Champ de référence et fonctions du modèle

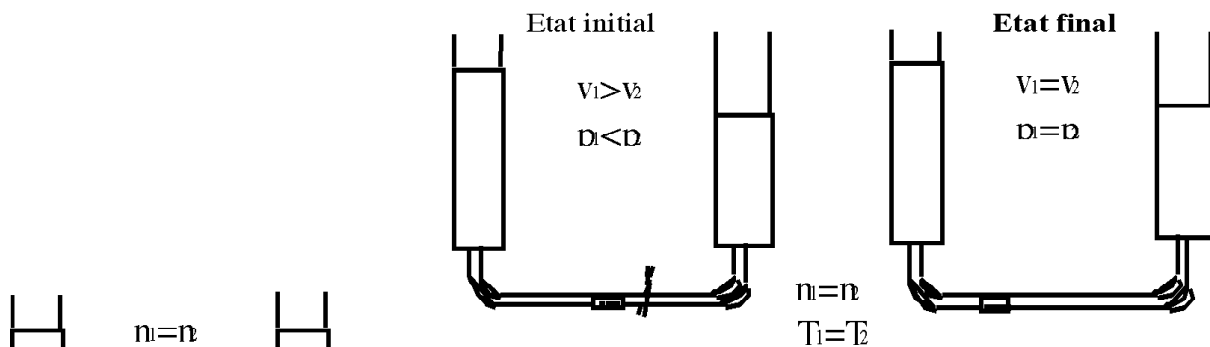
Les raisonnements attendus supposent l'établissement de relations de covariation entre nombre de particules, espace occupé, vitesse, fréquence et "force" des chocs sur une paroi. Les modèles

ainsi élaborés permettent d'interpréter et de prévoir des phénomènes mettant en jeu les propriétés thermoélastiques des gaz et d'interpréter les relations de covariation entre volume, température et pression d'un gaz.

Le choix des phénomènes à modéliser et des questions vise à placer les élèves en situation de prendre en considération progressivement les différentes variables du modèle. Il tient compte en particulier de résultats de recherche concernant l'enseignement de la notion de pression au collège (Séré, 1985) et les formes spécifiques du raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire (Rozier & Viennot, 1990 ; voir également le chapitre XXX de cet ouvrage). Nous avons voulu que, au cours de cette séquence, les modèles particuliers acquièrent un caractère prédictif. C'est pourquoi nous avons recherché des phénomènes dont la prévision posait problème aux élèves ou à propos desquels ils effectuaient des prévisions fausses. Ceci nous a conduits à faire travailler les élèves dans un premier temps à l'interprétation de phénomènes ne faisant pas intervenir la température (ni différences, ni variations de température). Les caractéristiques du modèle à mettre en jeu sont alors les dimensions des cadres, le nombre d'entités et la fréquence des chocs de ces entités sur une paroi. Les phénomènes interprétés dans un deuxième temps font intervenir des différences de température : vitesse des entités et "force" des chocs doivent alors être pris en considération.

Nous avons utilisé un dispositif expérimental simple (voir figure 3) pour faciliter la mise en correspondance entre les éléments de ce dispositif et les éléments de l'image animée (cadre, trait séparateur, entités mobiles). Ce dispositif comprend deux seringues (pleines d'air) reliées par un tuyau souple dans lequel peut se déplacer une goutte d'eau colorée. Une pince permet de "fermer" ce tuyau ; les pistons des seringues peuvent être bloqués. Les manipulations consistent à établir une différence de pression entre les deux sous systèmes gazeux (la pince étant serrée) et à laisser évoluer le système après avoir enlevé la pince. La différence de pression est établie, soit en déplaçant l'un des pistons (situation de *compression*), soit par chauffage de l'air contenu dans une des seringues (situation de *chauffage*).

Situation de "compression"



Situation de "chauffage"

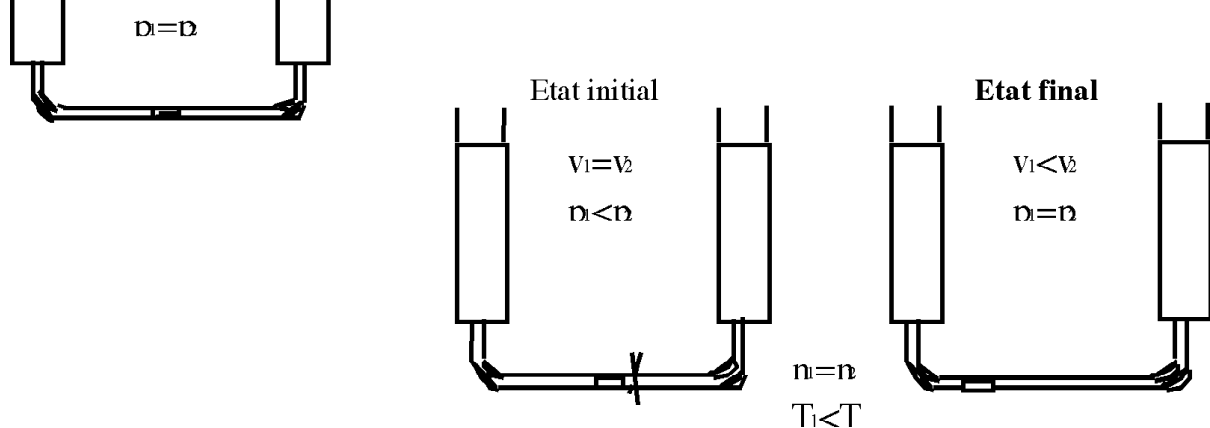


Figure 3: Dispositifs et situations expérimentales

- Pour chaque situation, le questionnement comporte une première phase de prévision, puis d'observation et d'explication des phénomènes, sans appel au modèle ; les questions concernent le déplacement, et l'immobilisation de la paroi

1. *Que va-t-il se passer si on enlève la pince ?*
2. *Est-ce que la goutte va se déplacer ?* *O oui* *O non* *O je ne sais pas*
Pourquoi ?
3. *Pourquoi la goutte a-t-elle bougé ?*
4. *Comment expliquer qu'elle s'arrête ? (Où s'arrête-t-elle ? A quelles conditions ?)*

- Il est ensuite demandé aux élèves de discuter la pertinence d'une simulation qui leur est proposée.

1. *Est-ce que l'animation convient pour représenter la situation avant qu'on enlève la pince ?* *O oui* *O non* *O je ne sais pas*
Si vous avez répondu oui, expliquez pourquoi cela convient.
Si vous avez répondu non, dites ce qu'il faudrait modifier, en expliquant pourquoi.
2. *Est-ce que l'animation convient pour représenter la situation juste après l'arrêt de la goutte ?* *O oui* *O non* *O je ne sais pas*
Si vous avez répondu oui, expliquez pourquoi cela convient.
Si vous avez répondu non, dites ce qu'il faudrait modifier, en expliquant pourquoi.

Une simulation pertinente ayant été obtenue, il est demandé aux élèves de proposer, en s'appuyant sur cette simulation, une explication du déplacement, puis de l'arrêt de la paroi.

1. *D'après l'animation proposée, pourquoi le trait de séparation (qui représente la goutte) va-t-il bouger ?*
2. *Comment expliquer qu'il s'arrête ? Ou s'arrête-t-il ? A quelles conditions ?*

Les possibilités d'affichage des nombres de chocs et de simulation avec paroi mobile peuvent être ensuite utilisées par les enseignants pour aider les élèves à développer les raisonnements visés.

Conduite de l'expérimentation didactique

L'expérimentation vise à fournir des informations sur la faisabilité et l'efficacité du processus d'apprentissage envisagé. Elle constitue également un test des hypothèses sous jacentes à l'élaboration de cette séquence (voir ci-après). Cette expérimentation a comporté plusieurs étapes.

Une première étape s'est déroulée sous forme de cinq entretiens faisant intervenir chacun un chercheur et deux élèves. Ces entretiens, effectués en deux séances de trois quarts d'heure environ chacune ont été enregistrés puis transcrits.

La deuxième étape a consisté en la mise en place de cette séquence dans seize classes de cinquième (2ème année de l'enseignement secondaire). Cette séquence a comporté six séances de une heure et demie chacune. Les données ont été recueillies sous forme écrite. Nous disposons pour chaque élève d'un jeu de neuf feuilles de travail correspondant à différents moments du questionnement. Ont été analysées les productions de dix élèves par classe, choisis au hasard (soit 160 élèves).

Dans une troisième étape, deux années après la mise en place de cette séquence, nous avons recueilli des informations complémentaires dans deux directions. Il s'agissait d'une part de

confirmer et de préciser des résultats que nous avons obtenu au cours de la séquence d'enseignement, d'autre part d'évaluer l'impact à long terme de ce processus d'apprentissage.

Résultats et discussion

L'analyse des données recueillies au cours des entretiens nous a permis de suivre la prise en considération progressive des différentes variables du modèle en relation avec les phénomènes modélisés et les questions posées (Chomat & al., 1990 ; Méheut & al., 1994).

- A propos de la *compression*, les élèves se sont d'abord préoccupés de traduire des effets (variation ou différence) de densité de l'air ; citons pour exemple :

Jonathan et Stanislas

- J* : Je voudrais réduire la taille du rectangle.
S : Et à peu près le couper en deux.
 ... *S* : Avec des petites particules qui soient plus serrées les unes que les autres.
 ... *J* : Celle de droite plus rétrécie que celle de gauche et le même nombre de particules dans les deux cases.

Pour expliquer le déplacement de l'index, certains d'entre eux font intervenir les chocs des particules sur le bord des cases et expliquent le déplacement et l'arrêt de la goutte en effectuant des comparaisons de *fréquences* de chocs de part et d'autre de la goutte.

Olivier et Pascal

- déplacement

- I* : Et sur l'image, comment ça se traduit que l'air pousse ?
O : L'air, ça rebondit un peu ; les petits points rebondissent sur la paroi, ici plus parce qu'ils ont moins d'espace donc ils tapent plus sur les endroits, sur les murs ...

P : Disons, comme ils ont moins d'espace, ils rebondissent plus sur toutes les parois, et comme ils vont à la même vitesse, ils rencontrent plus les parois.

- arrêt

- O* : Ils vont taper autant parce qu'ils auront autant d'espace.

Développer ce type de raisonnement n'est cependant pas immédiat pour tous les élèves. Il faut parfois des questions répétées de l'intervieweur, et l'utilisation d'une simulation à paroi mobile.

- A propos du *chauffage*, tous les élèves parviennent à une interprétation de l'élévation de *température* par un accroissement de *vitesse*. Cette relation entre *température* et *vitesse* a été proposée par certains élèves avant même que l'intervieweur ne leur demande de travailler sur la simulation (voir par exemple Olivier et Pascal). Elle a été acceptée plus difficilement par les autres qui, avant de la formuler, ou de la reprendre lorsqu'elle a été proposée par leur camarade, explorent d'autres possibilités : particules qui grossissent, se multiplient ; forces de répulsion entre les particules (Méheut et al., 1994) .

Olivier et Pascal

Ils semblent d'abord éprouver quelque difficulté à prévoir ce qui va se passer.

Pascal s'appuie ensuite sur l'idée de dilatation et effectue une prévision correcte.

- P* : L'air va se dilater et puis quand on va ouvrir, il va pousser ; il va plus pousser la goutte que le ...

Après avoir observé le phénomène, il passe de cette idée à celle d'une accélération des particules.

- P* : L'air était plus ... Les particules étaient plus écartées dans un espace toujours aussi restreint, elles tapaient beaucoup plus vite .

..*P* : Quoi, elles tapent beaucoup plus vite. C'est pas vraiment qu'elles sont plus espacées mais ... Elles s'entrechoquent beaucoup plus vite, elles bougent beaucoup plus vite.

- ..*P* : En chauffant, on a accéléré le mouvement des particules.

Olivier s'est jusque-là peu exprimé. En commentant la représentation iconique qu'il a réalisée, il développe l'idée que les particules ont grossi

O : Il y a autant de particules dans les deux seringues et elles tapent autant ; elles tapent toutes les deux autant sur la même paroi, donc la paroi reste stable et, deuxième situation, les particules grossissent donc quand elles tapent sur la paroi, ça fait un choc plus gros que quand les petites particules tapent sur la paroi.

Pascal intervient alors pour rappeler l'hypothèse d'immuabilité des particules. Olivier se range alors à l'avis de Pascal.

La question de la traduction d'une élévation de température se pose à nouveau lors de l'utilisation du logiciel.

- P : Faudrait essayer de chauffer, quoi !*
 ... *P : Faudrait essayer de recréer quand on chauffe.*
 ... *O : Sur l'ordinateur, est-ce qu'on pourrait faire quand on chauffe ?*

L'intervieweur leur renvoie la question.

- I : Comment est-ce qu'il faudrait faire ça ?*
P : Si ce que j'ai dit est juste, faudrait pouvoir accélérer le mouvement des particules dans celle-là.

Pascal demande alors à utiliser une simulation à paroi mobile pour tester son hypothèse.

L'exploitation de cette relation température-vitesse a été plus ou moins approfondie dans les différents groupes d'élèves. Certains établissent une relation entre *vitesse* des particules et *fréquence* des chocs, mais ne font pas intervenir la *force* des chocs ; l'équilibre correspond alors pour eux à l'égalité des *fréquences* des chocs de part et d'autre de la paroi. D'autres parviennent à développer des raisonnements mettant en jeu *fréquence* et *force* des chocs.

Jean Michel et Florence

- JM : ..Les chocs sont plus violents parce que les molécules vont plus vite...*
I : Et alors, la paroi, à ton avis, devrait s'arrêter quand ?
F : Quand les molécules bleues vont toucher le même nombre de fois la paroi.
JM : Par exemple, si un choc de molécule bleue vaut 10 et qu'il y a 10 chocs et que un choc de molécule noire vaut 5, il faudrait 20 chocs de molécules noires pour 10 chocs de molécules bleues ; et la paroi s'arrêtera.

Jonathan et Stanislas

- J : Comme à droite ça va plus vite, la force de frappe, si on peut appeler ça comme ça est plus grande que celle de gauche. Mais, comme à gauche ça touche plus de fois la paroi, les deux sont compensés.*

Les données recueillies au cours de la séquence donnent des indications sur l'efficacité à court terme et à plus long terme de cette séquence d'enseignement.

Ainsi, par exemple, les questions posées à la fin de la séquence nous ont permis de tester dans quelle mesure les élèves utilisent le modèle pour prévoir des phénomènes voisins de ceux simulés au cours de la séquence et le niveau de structuration du modèle qu'ils mettent en oeuvre (variables mises en jeu et relations entre elles). Il apparaît que plus de la moitié des élèves utilisent un modèle particulière pour argumenter les prévisions demandées ; un tiers environ raisonnent sur la *fréquence* des chocs, une moindre proportion font intervenir *force* et *fréquence* des chocs. Les prévisions effectuées par les élèves sont majoritairement correctes (plus de 80%).

Des questions posées deux ans après montrent que les élèves qui ont suivi cette séquence utilisent un modèle particulière dans une plus large proportion que les autres.

L'analyse des données recueillies au cours de la séquence nous a permis également de discuter les hypothèses sous jacentes aux choix de phénomènes et de questions structurant cette séquence.

Dans le choix des questions, nous avons fait l'hypothèse que les élèves prendraient plus facilement en considération les actions exercées par deux sous-systèmes pour interpréter

l'établissement d'un équilibre mécanique que pour interpréter un déplacement. Les données recueillies au cours de la séquence corroborent cette première hypothèse (table 1).

Situation	Explication	compression N= 145		chauffage N= 160	
		déplact	arrêt	déplact	arrêt
Prise en considération					
une seule quantité de gaz		96 %	69 %	88 %	56 %
les deux quantités de gaz		4 %	28 %	10 %	37 %
non réponse		0 %	3 %	2 %	7 %

Table 1 : Test de l'hypothèse H₁

Dans le choix des phénomènes, nous avons fait l'hypothèse que les propriétés thermoélastiques des gaz, faisant intervenir des différences ou des variations de température, seraient plus problématiques pour les élèves que des propriétés élastiques ne faisant pas intervenir la température. Les résultats obtenus corroborent cette deuxième hypothèse (table 2).

Prediction	Situation	compression N= 79	détente N= 77	chauffage N= 79	refroidisss N= 77
déplacement sens correct		77%	53%	22%	21%
pas de déplacement		11%	12%	39%	40%
déplacement sens incorrect		11%	31%	22%	25%
non réponse		0 %	4%	17%	14%

Table 2 : Test de l'hypothèse H₂

Cette hypothèse constituait un préliminaire pour une troisième hypothèse, à savoir que le modèle paraîtrait plus utile aux élèves pour des propriétés thermoélastiques, et donc qu'ils l'utiliseraient davantage que pour des propriétés élastiques. Les données recueillies au cours et après la séquence ne font pas apparaître un tel effet. Nous considérons donc que les choix de phénomènes et de questions structurant cette séquence devront être affinés si l'on veut qu'un modèle cinétique apparaisse à une grande majorité des élèves comme un outil cognitif plus efficace que d'autres et qu'ils l'utilisent préférentiellement à d'autres formes d'explication. Il nous semble utile, dans cette perspective, de garder présente à l'esprit l'importance, dans le long cheminement qui a conduit à l'acceptation des modèles atomistes par la communauté scientifique, de leur rôle unificateur de divers champs phénoménologiques. Faire jouer un tel type d'utilité et d'efficacité suppose une planification à plus long terme.

Conclusion

La conception de ces séquences tient compte des difficultés d'apprentissage repérées dans ce domaine et de caractères spécifiques des modèles atomistes. Pour chaque séquence, le choix des phénomènes, la formulation des questions, les contenus "théoriques" des modèles visés ont été fortement articulés. Les expérimentations réalisées ont permis de tester les hypothèses sous-jacentes à l'élaboration de ces "structures didactiques" (Lijnse, 1994) . Elles donnent des

indications précises sur l'efficacité des processus d'apprentissage visés et mettent en évidence les points faibles de ces structures par rapport à nos attentes, ouvrant ainsi des perspectives pour leur ajustement.

Références

- Bensaude - Vincent, B., & Kounelis, C. (1991). Les atomes. Une anthologie historique. Paris : Presses Pocket.
- Brooks, A., Briggs, H., & Driver, R. (1984). Aspects of secondary students' understanding of the particulate nature of matter. The University of Leeds.
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième . Aster,9, 143-184..
- Chomat, A., Larcher, C., & Méheut, M. (1990). Modèle particulière et démarches de modélisation. Paris : LIREST.
- Dow, W.M., Auld J. & Wilson, D.J. (1978). Pupils' concepts of gases, liquids, solids. Dundee : College of Education.
- Johnston , K. (1990). Students' responses to an active learning approach to teaching the particulate theory of matter. In P.L.Lijnse et al. (Eds.), Relating macroscopic phenomena to microscopic particles. (pp. 247-265).Utrecht : CDβ Press.
- Kubbinga, H. (1983). Le développement historique du concept de "molécule " dans les sciences de la nature jusqu'à la fin du 18ème siècle. Thèse de troisième cycle. Paris : EHESS.
- Lijnse, P.L. (1994). La recherche-développement : une voie vers une "structure didactique" de la physique empiriquement fondée. Didaskalia, 3, 93-108.
- Méheut, M. (1982). Combustions et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième. Thèse de troisième cycle. Université Paris 7.
- Méheut, M., & Chomat, A. (1990a). The bounds of children atomism ; an attempt to make children build up a particulate model of matter. In P.L.Lijnse et al. (Eds.), Relating macroscopic phenomena to microscopic particles. (pp. 266-282).Utrecht : CDβ Press.
- Méheut, M, & Chomat, A (1990b). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle particulière par des élèves de collège. European journal of psychology of education, 5,4,417-437.
- Méheut, M., Chomat, A., & Larcher, C. (1994). Construction d'un modèle cinétique de gaz par des élèves de collège : jeux de questionnement et de simulation. In M. Caillot (Ed.), Actes du quatrième séminaire national de la recherche en didactique des sciences physiques. (pp. 53-71). Amiens : IUFM de Picardie.
- Novick, S., & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter : an interview study. Science education, 62, 273-281.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accomodation : toward a principaled teaching strategy. Instructional Science, 11, 183-200.
- Pfundt, H. (1981). The final link in the division process or the first building block ? Pre-instructional conceptions about the structure of substances. Chimica didactica, 7, 75-94.

Pullman, B. (1995). L'atome dans l'histoire de la pensée humaine. Paris : Fayard.

Rozier, S., & Viennot, L. (1990). Students reasoning in thermodynamics. In P.L.Lijnse et al. (Eds), Relating macroscopic phenomena to microscopic particles. (pp. 36-49). Utrecht : CDB Press.

Séré, M. G. (1985) Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution. Thèse d'état. Université Paris 6.