

# Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège

## *Questionnement et simulation\**

**Martine MÉHEUT**

IUFM de l'Académie de Créteil  
Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur  
Université Paris 7-Denis Diderot  
75251 Paris cedex 05, Case 7021, France.

### **Résumé**

*La séquence pédagogique présentée ici fait jouer des aspects spécifiques des modèles particuliers : leur caractère rationnel plutôt qu'empirique, leur caractère d'analogie mécanique. Elle repose sur l'utilisation d'une animation informatique dérivant de la théorie cinétique des gaz. Nous avons cherché à placer les élèves en situation d'attribuer une signification à différentes variables intervenant dans cette animation et de construire à partir de ces variables un modèle interprétatif des propriétés thermoélastiques des gaz. L'analyse des données recueillies au cours d'entretiens et de séances de classe permet d'évaluer cette séquence comme dispositif d'enseignement ; elle conduit également à discuter les hypothèses sous-jacentes aux choix de phénomènes et de questions effectués pour élaborer cette séquence.*

**Mots clés :** *gaz, propriétés thermoélastiques, modèle cinétique, simulation, collège.*

\* Ce travail a été réalisé dans le cadre de la RCP Modélisation, Recherche Concertée sur Programme LIREST- INRP.

### **Abstract**

*In designing this learning sequence, we took into account some distinctive features of particle models ; their rational more than empirical foundations and their character of mechanical analogy. Using a computer simulation, we tried to put students into a position to give meaning to the variables of this simulation and to develop particle models to explain and predict thermoelastic properties of gas. The didactical experimentation included interviews and classroom sequences in French secondary schools. The analysis of the data provides information about the effectiveness of this learning process ; it allows us to discuss the hypotheses underlying the choice of phenomena and questions we formulated in planing this sequence.*

**Key words :** *gas, thermoelastic properties, kinetic model, computer simulation, secondary school.*

### **Resumen**

*La secuencia didáctica presentada aquí pone en juego dos aspectos específicos de los modelos particulares : su carácter racional más que empírico y su carácter de analogía mecánica. Ella reposa sobre la utilización de una animación informática derivada de la teoría cinética de los gases. Nosotros buscamos a poner al alumno en situación de atribuir una significación a diferentes variables intervinientes en esta animación y a hacer de esta animación un modelo interpretativo de las propiedades termoelásticas de los gases. Los datos recogidos en el transcurso de las entrevistas y de sesiones de clase suministran una evaluación de esta secuencia como dispositivo de enseñanza ; ellas permiten por otra parte de discutir las hipótesis sub-jacentes a la selección de fenómenos y de preguntas efectuada para la elaboración de esta secuencia.*

**Palabras claves :** *gas, propiedades termoelásticas, modelo cinético, simulación, colegio.*

L'épistémologie des modèles souligne deux caractéristiques importantes de ces constructions intellectuelles : leur caractère théorique et leur caractère fonctionnel (voir par exemple Walliser, 1977 ; Delattre & Thellier, 1979). Ces deux aspects ne sont bien sûr pas indépendants ; ainsi par exemple, un modèle statique de sphères indéformables permet d'expliquer ou de prévoir certaines propriétés géométriques de la matière à l'état cristallin, un modèle cinétique de points matériels est fonctionnel dans le champ des propriétés thermoélastiques des gaz, etc.

L'enseignement des modèles de structure de la matière dans les collèges français tenait peu compte de cette dimension d'outils théoriques, pertinents par rapport à un ensemble limité de questions sur le monde

matériel, en tout cas jusqu'au récent renouvellement des programmes en septembre 1993. Que ce soit dans les désormais anciens programmes ou les manuels destinés à l'enseignement dans les collèges, molécules et atomes sont présentés comme des objets dont l'«existence», la «réalité», ne sauraient être mises en question. Au-delà d'arguments d'autorité, les informations susceptibles de conférer à ces entités une certaine réalité sont la possibilité d'en obtenir des images, et les ordres de grandeur de leurs dimensions ; les domaines de pertinence des modèles susceptibles d'être construits à partir de ces entités n'apparaissent pas. On peut lire par exemple que «*Toutes les méthodes permettant d'étudier la structure des métaux conduisent à une même constatation : dans un métal, les atomes sont au contact les uns des autres, et disposés de manière ordonnée.*» (Chirouze et al., 1979, p. 60) ou encore «*Un examen approfondi montre qu'un métal est un empilement d'atomes identiques, parfaitement rangés les uns par rapport aux autres.*», et «*Ils se touchent dans la réalité.*» (Michaud & Le Moal, 1988, p. 113). Par rapport à quels phénomènes, quelles propriétés des métaux ces modèles sont-ils fonctionnels ? Que permettent-ils de prévoir, d'expliquer ? Ceci n'est guère évoqué.

Le caractère théorique de ces modèles semble également sous-estimé. Ainsi est-il demandé dans un manuel de classe de cinquième une explication du mouvement brownien (Durandea et al., 1987, p. 121). Dans un autre ouvrage, une explication de la vaporisation de l'eau est donnée de la manière suivante : «*L'agitation incessante et désordonnée des molécules devient prépondérante ; elles se dispersent dans toutes les directions. À cause de cette agitation, les distances entre les molécules deviennent considérables [...]*» (Chirouze et al., 1993, p. 70).

Prendre en considération ces deux caractères, théorique et fonctionnel, des modèles dans une démarche d'enseignement suppose tout d'abord d'assurer la cohérence entre les modèles objets de l'enseignement d'une part, les phénomènes et questions sur ces phénomènes d'autre part. Se pose également la question de l'adéquation de ces choix par rapport aux possibilités cognitives des élèves. C'est pourquoi nous avons pris en considération dans l'élaboration de cette séquence les résultats de recherches concernant :

- les conceptions des élèves à propos des propriétés thermoélastiques des gaz (Séré, 1985) ;
- les difficultés d'apprentissage dans le domaine de la structure de la matière (Dow et al., 1978 ; Novick & Nussbaum, 1978 ; Pfundt, 1981 ; Méheut, 1982 ; Brook et al., 1984 ; Rozier, 1988 ; Andersson, 1990...) ;
- les formes spécifiques du raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire (Rozier & Viennot, 1990 ; Viennot, 1993).

Il nous est apparu que certaines des difficultés d'apprentissage dans le domaine de la structure de la matière mises en évidence par les travaux de recherche didactique pourraient être éclairées par le développement historique des modèles particuliers (Boltzman, 1902 ; Perrin, 1903 ; Kubbinga, 1983 ; Bensaude & Kounelis, 1991 ; Pullman, 1995). En effet, l'atomisme s'est constitué moins à partir de données empiriques que d'une assertion philosophique : la permanence de la matière à travers ses transformations et son unité sous ses divers aspects. Les philosophes atomistes considéraient les sensations comme trompeuses. Reconnaisant le caractère « arbitraire » de certaines hypothèses, ils justifiaient cette élaboration théorique principalement comme un instrument d'unification et de prévision des phénomènes (Méheut, à paraître).

Dans l'élaboration de cette séquence, nous avons voulu mettre en jeu ces caractères qui apparaissent comme spécifiques des modèles particuliers de la matière : leurs origines rationnelles plutôt qu'empiriques, leur caractère d'instrument de pensée plutôt que de réalité observable et enfin leur caractère d'analogie mécanique, qui sert de support à diverses concrétisations.

L'épistémologie des modèles (Walliser, 1977 ; Delattre & Thellier, 1979) a constitué pour nous une référence utile non seulement pour le choix d'objectifs cognitifs (modèles visés et raisonnements nécessaires à la mise en œuvre de ces modèles) mais aussi pour l'élaboration de situations favorables à la construction de ces connaissances et raisonnements par les élèves. Dans ce cadre, nous avons envisagé des constructions de connaissances de différents ordres. Certaines concernent le modèle lui-même : établissement de relations entre variables du modèle, mise en œuvre de nouvelles variables. D'autres concernent les relations entre modèle et système modélisé. D'autres enfin concernent le comportement du système lui-même.

Dans une première étape, qui a fait l'objet de publications (Chomat et al., 1988 ; Larcher et al., 1990 ; Méheut & Chomat, 1990), nous avons fait travailler des élèves de quatrième (quatorze ans environ), puis de cinquième (treize ans environ) à l'interprétation de quelques aspects de transformations physiques de la matière dans le cadre d'un modèle encore très peu sophistiqué.

Dans la deuxième étape, qui est l'objet de cet article, le champ de référence est celui de propriétés thermoélastiques des gaz, le cadre théorique est celui de la théorie cinétique des gaz parfaits. Ce cadre théorique n'est bien sûr pas immédiatement accessible aux élèves ; il leur est proposé par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation.

## 1. CONCEPTION DE LA SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT : HYPOTHÈSES ET CHOIX

Nous avons fait le choix d'une approche «synthétique», phénomènes / questions / modèles, les modèles devant se préciser progressivement, en relation avec les questions. La séquentialisation inhérente au processus d'enseignement-apprentissage (Chevallard, 1985 ; Johsua, 1985) se manifeste donc par l'extension du champ de référence et par l'évolution des structures théoriques des modèles. Ainsi avons-nous choisi phénomènes et questionnements de telle sorte que les élèves soient en situation de construire des raisonnements de plus en plus élaborés, en faisant intervenir progressivement différentes variables du modèle (voir paragraphe 2.3). Notons que les raisonnements visés sont de type préquantitatif, seules les propriétés ordinales des variables étant mises en jeu dans des raisonnements de covariation.

Une hypothèse importante de ce travail (H) est que, pour être adopté par les élèves, un modèle doit leur être utile, autrement dit leur permettre d'expliquer, de prévoir les phénomènes de façon plus efficace. Cette hypothèse se rapproche des points de vue constructivistes développés par exemple par Posner et al. (1982) ou par von Glasersfeld (1994).

Nous avons recherché à cet effet des phénomènes dont la prévision ou l'explication posait problème aux élèves ou sur lesquels ils effectuaient des prévisions fausses. Des résultats de recherche (Séré, 1985), ainsi que des entretiens complémentaires (Chomat et al., 1992), montrent que des élèves de cet âge sont susceptibles de développer des raisonnements leur permettant de prévoir des phénomènes provoqués par des différences de pression lorsque la température n'intervient pas (ni différences, ni variations de température) ; ils raisonnent en termes de *tassement*, de tendance à revenir à un état *normal*, parfois en termes de différence ou d'égalité de *pression* – mais l'utilisation qu'ils font de ce terme laisse craindre une confusion entre densité et pression.

Nous avons fait l'hypothèse (H<sub>1</sub>) que la prévision et l'explication de phénomènes faisant intervenir la température (différence ou variation de température) leur posent davantage problème.

Nous avons donc choisi de faire travailler les élèves, dans un premier temps, à l'interprétation de phénomènes sans faire intervenir la 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 les bords des cadres. Dans un deuxième temps sont abordés des phénomènes mettant en jeu des différences de température ; *vitesse* des entités et *force* des chocs doivent également être pris en considération.

En ce qui concerne le choix du questionnement sur ces phénomènes (voir paragraphe 3), nous faisons l'hypothèse ( $H_2$ ) que pour prévoir ou expliquer un déplacement, les élèves ne prendront en considération qu'un seul sous-système gazeux, celui dont les actions sur la paroi ont le sens du déplacement ; alors que le questionnement sur l'immobilisation favorisera une prise en considération et une comparaison des actions exercées par les deux sous-systèmes.

## 2. OUTILS DIDACTIQUES POUR LA RÉALISATION DE LA SÉQUENCE

### 2.1. Logiciel de simulation

Ce logiciel génère une image d'entités mobiles se déplaçant dans un cadre rectangulaire (figure 1). Les règles de déplacement des entités dérivent de la théorie cinétique des gaz moyennant les procédures associées à la discrétisation du traitement et au faible nombre de particules (Chomat et al., 1990, pp. 76-78). Les positions initiales de ces entités sont tirées au hasard en décomposant l'espace limité par le cadre en cases (4x4 pixels). Leurs vitesses initiales sont réparties de façon quasi boltzmanienne autour d'une vitesse moyenne que l'utilisateur peut choisir. La trajectoire des entités ne peut être figurée de façon continue ; elles occupent des positions successives très rapprochées «en ligne droite» jusqu'à rencontrer les contours du cadre ou une autre entité ; leur vitesse est alors modifiée suivant une procédure de type réflexion s'il s'agit du cadre, ou conformément aux principes de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique s'il s'agit d'une autre entité.

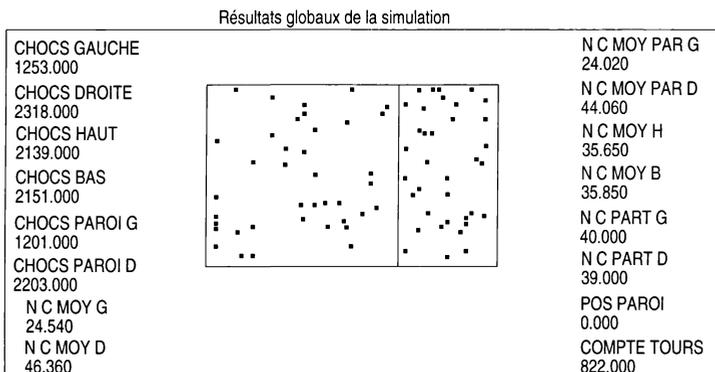


Figure 1 : «**Concrétisation**» du modèle ; copie d'écran

L'utilisateur peut choisir les dimensions du cadre ; il peut aussi le diviser en deux par un trait vertical dont il choisit la position. Ce trait peut, sur option, être mobile ; ses déplacements sont alors gérés de la manière suivante : on affecte à la paroi une masse et une vitesse, on calcule la somme des quantités de mouvement des particules qui heurtent la paroi de part et d'autre et on en déduit la variation de la vitesse de la paroi. Si pendant un tour de simulation, le déplacement de la paroi atteint la valeur définissant le côté d'une «case» (4 pixels), la paroi est déplacée.

L'utilisateur peut demander l'affichage des valeurs des paramètres de la simulation en cours et les valeurs des différentes variables :

- nombre de chocs sur une paroi, par unité de longueur de la 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.

## 2.2. Dispositif et manipulations

Nous avons choisi un dispositif «simple» (figure 2), de façon à rendre aussi aisée que possible la mise en correspondance entre les éléments de l'image animée (cadres, trait séparateur, entités mobiles), et les éléments du dispositif matériel. 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 ou un robinet permet de «fermer» ce tuyau ; les pistons des seringues peuvent être bloqués.

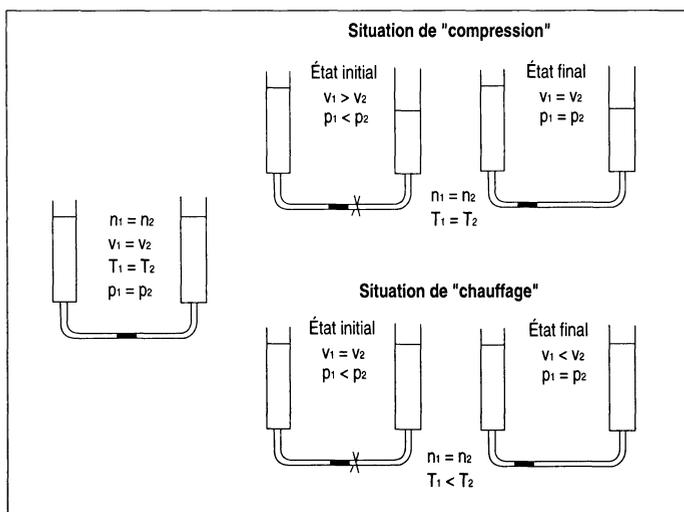


Figure 2 : Dispositif et situations expérimentales

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 un apport de chaleur (situation de *chauffage*).

### 2.3. Relations entre phénomènes et simulation

Au volume d'un système gazeux correspond la surface d'un cadre ; à une quantité de gaz un nombre d'entités, la température étant traduite par la vitesse quadratique moyenne des entités. Les forces de pression résultent des chocs des entités sur la paroi. La procédure de rebondissement des particules sur les bords des cases correspond à une paroi rigide et adiabatique (aucun échange d'énergie avec le milieu extérieur, que ce soit sous forme de travail des forces de pression ou sous forme de chaleur). Les déplacements de la paroi mobile traduisent par contre des échanges d'énergie entre les deux échantillons gazeux sous forme de travail.

Les échanges énergétiques apparaissent donc comme fortement simplifiés par rapport au dispositif réel. Ceci constitue une limite de cette simulation ; notons que cette limitation n'apparaît pas dans l'usage qui est fait ici de la simulation.

Dans le cadre de cette séquence, nous souhaitons placer les élèves en situation de construire les significations suivantes :

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| (1) quantité de gaz      | <i>nombre de particules</i>                             |
| (2) volume des enceintes | <i>surface des cases</i>                                |
| (3) température          | <i>vitesse (quadratique moyenne)<br/>des particules</i> |
| (4) actions de pression  | <i>chocs : fréquence et «force»</i>                     |

et de développer des relations préquantitatives entre ces variables, par exemple :

– **dans le cas de la compression**

- mise en mouvement

Les deux seringues contiennent des quantités de gaz égales à la même température.

*Les deux cases contiennent des nombres égaux de particules animées de mouvements de même vitesse (quadratique moyenne).*

Si le volume de la seringue de droite est inférieur au volume de la seringue de gauche, les actions de pression exercées sur la paroi par l'échantillon de droite sont supérieures à celles exercées par l'échantillon de gauche.

*Si la surface de la case de droite est inférieure à la surface de la case de gauche, la fréquence des chocs sur la paroi des particules de droite est supérieure à celle des chocs des particules de gauche.*

- immobilisation

(En supposant que les températures des deux échantillons restent égales)

La paroi reste immobile lorsque les actions de pression sont égales ; les volumes des échantillons sont alors égaux.

*La paroi reste immobile lorsque les fréquences de chocs sont égales ; les surfaces des cases sont alors égales.*

–  **dans le cas du chauffage**

- mise en mouvement

Les deux seringues, de même volume, contiennent des quantités de gaz égales.

*Les deux cases, de même surface, contiennent des nombres de particules égaux.*

Si la température de l'échantillon de droite est supérieure à la température de l'échantillon de gauche, les actions exercées sur la paroi par l'échantillon de droite sont supérieures à celles exercées par l'échantillon de gauche.

*Si la vitesse des particules de droite est supérieure à la vitesse des particules de gauche, la force des chocs des particules de droite est supérieure à la force des chocs des particules de gauche.*

- immobilisation

(En supposant que la température de l'échantillon de droite reste supérieure à celle de l'échantillon de gauche)

*La force des chocs des particules de droite restera supérieure ; pour que la paroi s'arrête, il faut donc que la fréquence soit plus faible, le volume de droite sera donc supérieur au volume de gauche.*

### 3. EXPÉRIMENTATION DIDACTIQUE

Les apprentissages visés dans cette expérimentation s'intègrent dans une perspective à plus long terme d'enseignement des modèles de structure de la matière. Dans les expérimentations que nous avons réalisées, ils viennent après une première phase dont les objectifs étaient la mise en œuvre par les élèves de l'idée d'éléментарité pour interpréter la conservation de la matière dans quelques transformations physiques. Au cours de cette

première phase, nous avons cherché à faire établir par les élèves des relations entre :

- surface (dimensions) des cadres et volume des échantillons de gaz,
- nombre de particules et quantité de gaz.

Ce travail s'est appuyé sur l'utilisation de représentations iconiques statiques (petits dessins). Dans cette première phase, les aspects cinétiques ont été à peine abordés : la mobilité des particules a été évoquée pour interpréter le mélange par diffusion de deux gaz ; le mouvement n'a été ni figuré, ni caractérisé.

Dans la deuxième phase, qui est l'objet de cet article, nous cherchons à placer les élèves en situation de s'approprier certains aspects de la théorie cinétique des gaz, qui leur est présentée par l'intermédiaire du logiciel, pour se construire un modèle cinétique de gaz.

Les activités que nous leur proposons dans cette perspective consistent à élaborer, à l'aide du logiciel, des simulations de quelques phénomènes et à s'appuyer sur ces simulations pour développer des raisonnements permettant la prévision, ou l'explication, de quelques aspects de ces phénomènes : sens de déplacement et conditions d'équilibre.

L'expérimentation vise à fournir des informations sur l'accessibilité de tels objectifs (et à les préciser). Elle constitue par ailleurs un test des hypothèses relatives aux questionnements considérés comme favorables à de telles élaborations.

Cette expérimentation a comporté plusieurs étapes.

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

La deuxième étape a consisté en la mise en place d'une séquence d'enseignement dans seize classes de cinquième. Cette séquence s'est étendue sur six séances d'une heure et demie chacune, soit une durée totale de neuf heures. Les données ont été recueillies sous forme écrite. Nous disposons pour chaque élève d'un jeu de neuf fiches correspondant à différents moments du questionnement. Ont été analysées les productions de dix élèves par classe (soit 160 élèves), choisis au hasard.

Dans une troisième étape, deux années après la mise en place de cette séquence, nous avons recueilli, par des questionnaires écrits auprès d'élèves ayant ou non déjà participé à cette expérimentation, des informations complémentaires dans deux directions. Il s'agissait d'une part de confirmer et de préciser des résultats que nous avons obtenus par l'analyse des

données recueillies au cours de la séquence d'enseignement, d'autre part d'évaluer l'impact à long terme de cette séquence.

### 3.1. Entretiens

Comme indiqué aux paragraphes 1 et 2.2, les questions portent sur une situation de *compression*, puis de *chauffage*.

– 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, son sens, et l'immobilisation de la paroi.

– *Que va-t-il se passer si on enlève la pince ? Pourquoi ?*

– *Que s'est-il passé ? Pourquoi ?*

– *Pourquoi la goutte s'est-elle arrêtée ?*

Ces questions ont pour but de favoriser une première lecture du phénomène en termes d'actions de deux sous-systèmes gazeux sur la paroi.

Du point de vue de la recherche, nous souhaitons déterminer dans quelle mesure les élèves sont, ou non, capables de prévoir, et d'expliquer, ces phénomènes, ce qui revient à mettre à l'épreuve l'hypothèse ( $H_1$ ) qui a orienté le choix des phénomènes de référence. L'analyse des justifications des prévisions et des explications met à l'épreuve l'hypothèse ( $H_2$ ).

– Dans une deuxième phase, une représentation iconique (petit dessin) du dispositif est demandée aux élèves.

– *Représente l'air dans les seringues et le tuyau avant qu'on enlève la pince et après l'arrêt de la goutte. Explique tes dessins.*

– *Pourquoi la goutte s'est-elle déplacée ? Pourquoi la goutte s'est-elle arrêtée ?*

Le but de ces questions est d'amener les élèves à prendre en considération les deux sous-systèmes gazeux, que la représentation et l'explication qu'ils proposent soient continues ou particulières.

– Le questionnement comporte une troisième phase : l'utilisation du logiciel pour modéliser le système et obtenir une simulation de son évolution.

Dans cette phase, il est d'abord demandé aux élèves de discuter la validité d'une simulation qui leur est proposée.

– *Que vois-tu ?*

– *Pourrait-on utiliser ce logiciel pour représenter ce qui s'est passé ?*

– *Est-ce que ça convient pour représenter l'air dans les seringues juste avant qu'on enlève la pince ? Que faut-il modifier ?*

L'enjeu de ce travail concerne les relations 1, 2, 3 (voir paragraphe 2.3) ; il s'agit de choisir de façon pertinente les valeurs des paramètres du modèle : surface des cadres, nombre d'entités dans chaque cadre, *vitesse* des entités dans chaque cadre.

Les questions visent ensuite à faire construire par les élèves une explication du déplacement et de l'arrêt de la paroi en se servant de la simulation. L'enjeu (relation 4) est ici l'interprétation des actions de pression par les *chocs* des entités sur les bords des cases.

- *D'après la simulation, la goutte va-t-elle bouger ? Pourquoi ?*
- *Pourquoi, d'après la simulation, la goutte ne bouge-t-elle plus ?*

Dans la situation de *compression*, il suffit, pour prévoir le sens de déplacement de la paroi, de comparer les *fréquences* de chocs de part et d'autre de la paroi, et, de fait, les densités de particules, les températures étant supposées égales. Si l'on néglige les variations de température dans chaque compartiment, il est facile de prévoir que la paroi s'immobilisera lorsque les volumes occupés par les deux échantillons seront les mêmes.

Dans la situation de *chauffage*, interviennent la différence des *vitesse*s et les effets de cette différence sur la *fréquence* et la *force* des chocs ; ceci permet de prévoir (ou d'expliquer) le sens de déplacement de la paroi. L'interprétation de l'immobilisation demande un raisonnement complexe. En supposant que la température de l'air initialement chauffé reste supérieure à celle de l'autre compartiment, la *force* des chocs reste différente de part et d'autre de la paroi. De plus, au cours de cette évolution, les volumes des compartiments, donc les densités de particules varient. Un raisonnement qualitatif ne suffit plus à déterminer les sens de variation des *fréquences* de chocs de part et d'autre de la paroi au cours de l'évolution du système. On peut cependant affirmer qu'à l'équilibre, la *fréquence* des chocs du côté initialement chauffé sera inférieure à la *fréquence* des chocs de l'autre côté.

### 3.2. Séquence d'enseignement

L'organisation de cette séquence reprend les différentes étapes du protocole d'entretien.

– Nous avons cependant jugé utile d'ajouter un type de question que nous avons mis en œuvre dans notre précédent travail, qui consiste à décrire les changements d'état en précisant les invariants et les variables. Ainsi, pour chaque phénomène étudié, avons-nous commencé par une question de ce type. L'état initial du système étant ainsi caractérisé, venaient les demandes de prévision sur son évolution.

1. *Qu'est-ce qui a changé ?*

- pour l'air de la seringue de droite :
- pour l'air de la seringue de gauche :

2. *Qu'est-ce qui n'a pas changé ?*

- pour l'air de la seringue de droite :
- pour l'air de la seringue de gauche :

3. *Que va-t-il se passer si on enlève la pince ?*

4. *Est-ce que la goutte va se déplacer ?*

- oui    non    je ne sais pas

*Pourquoi ?*

- Après observation, venaient des demandes d'explication.

1. *Pourquoi la goutte a-t-elle bougé ?*

2. *Comment expliquer qu'elle s'arrête ? (Où s'arrête-t-elle ? À quelles conditions ?)*

– Il était ensuite demandé aux élèves de discuter la pertinence d'une simulation qui leur était proposée. Compte tenu du faible nombre d'ordinateurs, des contraintes de temps et d'encadrement des élèves, il ne nous a pas été possible de laisser les élèves manipuler l'ordinateur. C'est l'enseignant qui a effectué ces manipulations, les élèves exprimant leurs choix soit par oral, soit par écrit.

1. *Est-ce que l'animation convient pour représenter la situation avant qu'on enlève la pince ?*

- oui    non    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 ?*

- oui    non    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 était 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 ? Où s'arrête-t-il ? À quelles conditions ?*

Les possibilités d'affichage des nombres de chocs et de simulation

avec paroi mobile pouvaient être ensuite utilisées par les enseignants pour aider les élèves à développer les raisonnements visés.

– Cette démarche ayant été effectuée à propos des situations de *compression* et de *chauffage*, une autre situation (*détente* ou *refroidissement*) était proposée à titre de réinvestissement.

### 3.3. Questionnaires complémentaires

Nous voulions par ces questionnaires recueillir des données susceptibles de préciser et de confirmer les résultats que nous avons obtenus lors des entretiens et de la séquence d'enseignement dans la perspective de valider notre hypothèse  $H_1$  (les propriétés thermoélastiques des gaz posent davantage problème aux élèves que les propriétés élastiques).

Nous avons à cet effet proposé une série de questions à des élèves de classe de cinquième (3 classes, 74 élèves) et de quatrième (3 classes, 82 élèves). Les élèves de cinquième n'avaient pas suivi d'enseignement de physique au collège du fait de la suppression des enseignements de physique et chimie en sixième (septembre 1991) et cinquième (septembre 1992). Par ailleurs, le programme de quatrième ne comporte pas d'étude des propriétés thermoélastiques des gaz.

Les questions étaient présentées sous forme de deux questionnaires, distribués chacun à la moitié des élèves d'une classe. Nous disposons donc d'environ 80 réponses pour chaque question.

Nous avons par ailleurs soumis un ensemble de questions à des élèves de troisième ayant suivi un enseignement relatif aux propriétés thermoélastiques des gaz (12 classes, 250 élèves). Une partie d'entre eux (107) avait participé à la séquence d'enseignement au cours de leur année de cinquième, soit deux ans auparavant. Il s'agissait ici pour nous d'évaluer l'impact à long terme de cette séquence. Les questions étaient présentées sous forme de quatre questionnaires ; chaque élève a répondu à un seul questionnaire.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1. Analyse des entretiens

#### 4.1.1. *Prévision sans utilisation du modèle*

L'analyse des données recueillies lors des entretiens (cf. paragraphe 3) confirment que les élèves disposent de raisonnements suffisants pour

prévoir le sens d'évolution des systèmes dans le cas de la compression. Ainsi, au cours des entretiens, tous les élèves prévoient-ils correctement le sens de déplacement de l'index.

Pour prévoir ce déplacement, ils raisonnent sur un seul système gazeux, celui qui a subi une compression. Aucun élève ne prend ici en considération le gaz enfermé dans l'autre seringue. Le raisonnement majoritaire (7/10) peut être schématisé de la manière suivante : *l'air possède un état normal, non comprimé ; le déplacement du piston écarte l'air de cet état ; l'air tend alors à y revenir.*

Jonathan : *L'air comprimé ici, il va partir d'un seul coup et pousser le liquide vers la gauche jusqu'à ce que tout l'air soit dépressurisé.*

Julia : *Tout l'air qui est comprimé ici va se... Il va se remettre normalement, l'air va se remettre bien dans le tuyau et ça va pousser le liquide.*

Les prévisions concernant la situation de chauffage sont moins assurées.

Parmi les neuf élèves présents lors de cette séance, quatre seulement prévoient correctement le sens de déplacement de l'index, deux prévoient que l'index ne se déplacera pas, deux disent ne pas savoir ce qui va se passer, le dernier ne s'exprime pas sur ce point.

#### **4.1.2. Modélisation**

Le passage à un modèle particulière a été effectué, lors des entretiens, par certains élèves à l'occasion de la représentation iconique, par les autres lors de la mise en œuvre du logiciel comme outil de simulation.

##### 4.1.2.1. Compression

– Lors de la représentation iconique, les élèves se sont surtout préoccupés de traduire des effets (variation ou différence) de densité de l'air. Cinq élèves (quatre groupes) le font en représentant des particules plus ou moins espacées ; citons pour exemple :

##### Alexis et Laurent

*L : Les particules, elles sont plus resserrées ; donc il y a une pression. Alors que là, elles sont moins serrées.*

*I : Bon, et quand la goutte s'arrête, alors ?*

*L : Ben, c'est que les particules sont aussi serrées d'un côté que de l'autre.*

– Cette caractéristique est également prise en considération par six élèves (quatre groupes) au cours de la discussion de la validité d'une

simulation, seule ou en relation avec le nombre de particules et les dimensions du cadre.

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, trois élèves (deux groupes) 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 groupes. Un groupe raisonne uniquement en termes de densité de particules. Deux groupes raisonnent d'abord en termes de densité et n'évoquent les chocs de particules qu'après des questions insistantes de l'intervieweur, et devant une simulation à paroi mobile.

4.1.2.2. 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 trois élèves, dans trois groupes différents, avant même que l'intervieweur ne leur demande de travailler sur la simulation (voir par exemple Olivier et Pascal). Elle a été proposée par un élève en réponse à cette demande. 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'immobilité 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. Une élève, après avoir formulé cette hypothèse, ne parvient pas à l'utiliser pour construire une interprétation des phénomènes. Cinq élèves (trois groupes) 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. Deux élèves parviennent à développer des raisonnements mettant en jeu *fréquence* et *force* des chocs. Un élève ne s'est pas exprimé à ce sujet.

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.*

### 4.1.3. Apports de la simulation

Comme nous l'avons vu précédemment, l'interprétation des forces de pression par les chocs des particules contre une paroi a été effectuée sans difficulté par trois groupes d'élèves. Pour deux groupes, l'intervieweur a fait appel à une simulation à paroi mobile.

L'affichage des comptages de nombres de chocs a été mis en œuvre, soit à l'initiative de l'intervieweur, soit à la demande d'un élève lors des demandes d'explication du déplacement et de l'immobilisation de l'index mobile.

Ainsi un élève, après avoir fait l'hypothèse d'une relation entre température et *vitesse* des particules, a demandé à utiliser une simulation avec paroi mobile.

Olivier et Pascal

*P : Si ce que j'ai dit est juste, faudrait pouvoir accélérer le mouvement des particules dans celle-là.*

- ... I : Dans le logiciel, on peut changer la vitesse donc qu'est-ce qu'il faudrait, là ?
- ... P : Il faudrait mettre une paroi mobile et on verrait si quand ça accélère ça pousse ou pas.
- ... I : Alors, qu'est-ce que tu voudrais voir comme logiciel ? Il y a deux possibilités : soit on laisse la paroi fixe et puis on compte les chocs, soit on met la paroi mobile ; qu'est-ce que vous voulez voir ?
- P : Est-ce qu'on peut mettre la paroi mobile et puis compter les chocs ?

C'est en regardant cette simulation que les élèves ont développé les raisonnements reliant *vitesse* des particules et *fréquence* des chocs.

Deux élèves ont également fait appel à une simulation pour «vérifier», dans le cas du *chauffage*, que la position d'équilibre correspondait à des *fréquences* de chocs, de part et d'autre de la paroi, égales. Cette interprétation n'étant pas vérifiée, ils n'ont, dans le temps imparti à l'entretien, pas trouvé d'issue à cette contradiction.

Dans le cas du *chauffage* également, cette intervention, initiée par l'intervieweur, a conduit deux élèves à développer des raisonnements faisant intervenir *fréquence* et *force* des chocs.

## 4.2. Résultats de la séquence d'enseignement

Nous présentons ici les principaux résultats issus de l'analyse des données ; une présentation plus détaillée en a été faite dans Méheut et al. (1994). Ces résultats peuvent être lus d'une part comme une évaluation de l'efficacité pédagogique de la séquence, d'autre part comme un test des hypothèses sous-jacentes à la conception de la séquence.

### 4.2.1. Évaluation de l'efficacité de la séquence d'enseignement

L'efficacité à court terme de la séquence a été évaluée en particulier en termes de réinvestissement du modèle à la prévision et à l'interprétation dans des situations légèrement différentes de celles abordées au cours de l'enseignement. En gardant le même dispositif, nous avons proposé une *détente* et un *refroidissement*. Les élèves devaient effectuer des prévisions à propos d'une des situations.

Les prévisions concernant le sens du déplacement sont correctes pour une grande majorité des élèves pour la situation de détente (91 %), un peu moins pour la situation de refroidissement (80 %).

Situation		détente N = 96	refroidissement N = 70
Raisonnement			
<b>particules</b>	actions	12 %	10 %
	fréquence des chocs	<b>53 %</b>	<b>60 %</b>
	autres	6 %	16 %
<b>non particules</b>	statique	10 %	6 %
	actions	<b>44 %</b>	<b>40 %</b>
	autres	22 %	4 %
Prise en considération des deux quantités de gaz		55 %	69 %
d'une seule quantité de gaz		42 %	31 %
non réponse		3 %	1 %

Table 1 : Réinvestissement du modèle à la fin de la séquence

Pour les deux situations, un peu plus de la moitié des élèves raisonnent en termes de particules (voir table 1). La plupart d'entre eux appuient leur prévision sur une comparaison de la fréquence des impacts.

– Dans la situation de *détente*, 15 % explicitent une relation entre dimensions des cadres et fréquence des impacts ; par exemple :  
*(La goutte va se déplacer) parce qu'à gauche, l'espace est plus petit donc les particules vont heurter les parois plus de fois...*

– Pour la situation de *refroidissement*, 26 % explicitent une relation entre vitesse des particules et fréquence des chocs ; par exemple :  
*Elle (la goutte) va se déplacer car la fraîcheur réduit la vitesse des particules ; donc il y a moins de chocs...*

Ils sont 13 % à prendre en considération à la fois la *force* et la *fréquence* des chocs ; par exemple :  
*Elle (la goutte) s'arrête car le volume ayant diminué à droite, les chocs seront plus fréquents à droite, donc on aura : à gauche, chocs violents mais peu fréquents ; à droite, chocs fréquents mais peu violents. Donc on aura rétabli l'équilibre suivant la violence et le nombre de chocs.*

Table 2a

Situation	Population témoin		Après la séquence	
	Chauffer N = 80	Refroidir N = 63	Chauffer N = 50	Refroidir N = 57
Prédiction				
Déplacement sens correct	72 %	52 %	80 %	47 %
Pas de déplacement	12 %	21 %	12 %	25 %
Déplacement sens incorrect	11 %	22 %	8 %	25 %
non réponse	4 %	5 %	0 %	3 %

Table 2b

Situation	Population témoin		Après la séquence	
	Chauffer N = 80	Refroidir N = 63	Chauffer N = 50	Refroidir N = 57
Explication particulière	5 %	3 %	22 %	26 %
non particulière	81 %	76 %	60 %	56 %
pas d'explication	14 %	21 %	18 %	17 %
Situation de «chauffage» :	$\chi^2 = 9,9$	$p < 0,01$		
Situation de «refroidissement» :	$\chi^2 = 13,2$	$p < 0,01$		

Table 2 : Efficacité à long terme de la séquence d'enseignement

L'efficacité à plus long terme de cet apprentissage peut être évaluée à partir des réponses aux questionnaires complémentaires (voir paragraphe 3.3). L'analyse de ces réponses ne révèle aucune différence significative entre les élèves ayant suivi cette séquence et les autres, en ce qui concerne la prévision des phénomènes (table 2a). Par contre, les élèves ayant suivi cette séquence utilisent davantage un modèle particulière que les autres (table 2b).

#### 4.2.2. Test des hypothèses sous-jacentes à la conception de la séquence

Notre première hypothèse était que les étudiants utiliseraient un modèle dans la mesure où il leur semblerait utile, c'est-à-dire dans la mesure où il leur permettrait d'expliquer ou de prévoir des phénomènes de manière plus efficace. En relation avec cette hypothèse très générale, nous avons fait l'hypothèse ( $H_1$ ) que les phénomènes faisant intervenir la température (variation ou différence de température) se révéleraient plus «problématiques» que les propriétés élastiques dans lesquels la température n'intervient pas. Enfin, dans le choix des questions, nous avons fait l'hypothèse ( $H_2$ ) que les étudiants prendraient en considération et effectueraient des comparaisons entre les actions exercées par les deux systèmes davantage pour expliquer ou prévoir l'immobilisation que le déplacement de l'index mobile.

Si l'on considère l'hypothèse ( $H_1$ ), les réponses aux questionnaires complémentaires (table 3) montrent que les élèves sont en mesure de prévoir les propriétés des gaz liées à une variation de volume : *compression* (ils sont plus de 70 % à effectuer des prévisions correctes) ou *détente* (plus de 50 %) ; les propriétés faisant intervenir des variations de température apparaissent effectivement comme plus problématiques (ils ne sont que 20 % à faire des prévisions correctes).

Situation	compression N = 79	détente N = 77	chauffage N = 79	refroidissement 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 3 : Test de l'hypothèse H<sub>1</sub>

Si l'on considère l'hypothèse (H<sub>2</sub>), les résultats obtenus durant la séquence d'enseignement mettent en évidence une différence significative entre les questions concernant le déplacement et les questions concernant l'immobilisation (table 4). Dans la situation de *compression*, 4 % seulement des élèves prennent en considération les deux échantillons de gaz pour expliquer le *déplacement* ; 28 % le font lorsqu'il s'agit d'expliquer l'*immobilisation*. Dans la situation de *chauffage*, 10 % seulement des élèves prennent en considération les deux échantillons de gaz pour expliquer le *déplacement* ; 37 % le font lorsqu'il s'agit d'expliquer l'*immobilisation*.

Situation	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 %
	$\chi^2 = 36,4$ p < 0,001		$\chi^2 = 40,5$ p < 0,001	

Table 4 : Test de l'hypothèse H<sub>2</sub>

Ces résultats contribuent donc à la validation des deux hypothèses (H<sub>1</sub>) et (H<sub>2</sub>).

En ce qui concerne notre hypothèse générale par contre, nous n'avons, à la fin de la séquence, noté aucune différence significative dans l'utilisation du modèle à propos de situations de *détente* et de situations de *refroidissement* (table 1).

## 5. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Les résultats obtenus contribuent à la description d'étapes possibles et d'obstacles à franchir dans l'enseignement de premières notions de structure de la matière, si l'on se place dans une perspective de modélisation de systèmes physiques et d'utilisation de ces modèles comme instruments d'interprétation et de prévision de phénomènes physiques.

Les observations réalisées au cours des entretiens et de la séquence d'enseignement apportent des informations sur les changements que les élèves doivent opérer dans leurs manières de raisonner. Certains de ces changements renvoient à des résultats de recherche déjà bien assurés :

– passage d'une explication finaliste : *l'air a un état normal, il tend à y revenir s'il s'en trouve écarté* (Séré, 1985) à une explication dynamique, à caractère causal (recherche de forces) ;

– développement de raisonnements non linéaires (voir en particulier Viennot, 1993) : prise en considération des forces exercées par deux sous-systèmes sur un même troisième.

D'autres apparaissent plus spécifiques :

– développement de raisonnements dans un micro-monde très contraint (particules immuables, dotées de propriétés newtoniennes : mouvement inertiel et chocs élastiques) ;

– séparation et mise en relation de deux modes de description des phénomènes : mode phénoménologique et modèle, les relations entre variables phénoménologiques et variables du modèle n'étant pas toutes biunivoques ; l'interprétation d'une variation de pression par exemple pouvant demander de raisonner à la fois sur la *fréquence* et la *force* des chocs, la *fréquence* des chocs dépendant elle-même, pour un système de particules donné, du volume et de la vitesse des particules, donc de la température.

Si l'on s'intéresse à l'efficacité de cette séquence comme dispositif d'enseignement, on peut éprouver une certaine satisfaction en comparant les prévisions effectuées par les élèves à l'issue de cette séquence à celles d'élèves n'ayant reçu aucun enseignement relatif aux propriétés thermoélastiques des gaz. Ainsi dans leur quasi-totalité, les élèves effectuent-ils, à l'issue de la séquence, des prévisions correctes sur des phénomènes mettant en jeu des propriétés thermoélastiques des gaz. La majorité d'entre eux utilisent alors le modèle de façon convenable (un raisonnement en termes de fréquence de chocs était ici suffisant, compte tenu de la question posée). Par contre on doit noter qu'à l'issue de cette séquence, une faible fraction d'élèves seulement est parvenue à développer des raisonnements mettant en jeu *fréquence* et *force* des chocs. Le temps imparti à ce travail,

les situations didactiques mises en œuvre n'ont permis qu'à une minorité d'élèves d'élaborer ces raisonnements complexes.

Deux ans après, et par comparaison à une population d'élèves ayant suivi un autre enseignement, les résultats sont également discutables. Les prévisions des élèves ayant suivi la séquence d'enseignement ne semblent pas significativement différentes de celles des autres élèves par rapport à des questions similaires à celles abordées au cours de la séquence d'enseignement. Ils sont cependant (un peu) plus nombreux à utiliser un modèle particulière que les autres élèves.

Si l'on se place dans une perspective de test d'hypothèses, les données recueillies confirment qu'avant un enseignement concernant les propriétés thermoélastiques des gaz, les élèves sont capables, dans une proportion beaucoup plus importante, de prévoir les propriétés des gaz associées à des variations de volume (compression ou détente), sans prendre en considération d'éventuelles variations de température ; les propriétés des gaz liées à des variations de température leur posent effectivement davantage de problèmes (hypothèse H<sub>1</sub>). Elles mettent par ailleurs en évidence une différence significative entre questions concernant l'immobilisation et questions concernant le déplacement, eu égard à la prise en considération des actions exercées par deux sous-systèmes (hypothèse H<sub>2</sub>).

Les questions posées deux ans après à des élèves ayant participé à cette séquence montrent que ceux-ci, d'une part, n'utilisent pas explicitement le modèle dans leur majorité (même s'ils le font plus que les autres), d'autre part n'effectuent pas, statistiquement, des prévisions plus justes que des élèves ayant suivi un enseignement différent sur cette partie du programme.

Ceci nous amène à revoir notre hypothèse initiale, concernant l'utilité et l'efficacité du modèle. Nous devons donc considérer que les questions que nous avons choisies n'ont pas été suffisantes pour que le modèle apparaisse utile aux élèves et qu'ils l'utilisent préférentiellement à d'autres formes d'explications. Des questions concernant l'isotropie et l'homogénéité des forces de pression pourraient s'avérer plus fructueuses dans cette perspective (Méheut et al., 1994) ; cependant rien ne nous permet aujourd'hui d'affirmer que les élèves ne puissent, ici encore, développer des explications locales, fonctionnelles par rapport à un ensemble de questions limité. Il faut nous souvenir que l'une des forces des modèles particuliers réside dans leur caractère unificateur. Il est clair que faire jouer un tel type d'utilité et d'efficacité demande du temps.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSSON B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In P.L. Lijnse et al. (Eds), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*. Utrecht, CDB Press, pp. 12-35.
- BENSAUDE-VINCENT B. & KOUNELIS C. (1991). *Les atomes. Une anthologie historique*. Paris, Presses Pocket.
- BOLTZMANN L. (1902). *Leçons sur la Théorie des Gaz*. Paris, Gauthier-Villars.
- BROOKS A., BRIGGS H. & DRIVER R. (1984). *Aspects of Secondary Students' Understanding of the Particulate Nature of Matter*. The University of Leeds.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble, La Pensée Sauvage.
- CHIROUZE P.-J., BÉRANGER M. & VENTO R. (1979). *Sciences physiques, classe de quatrième*. Paris, Colin.
- CHIROUZE P.-J. & VENTO R. (1993). *Sciences physiques, quatrième*. Paris, Colin.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation. *Aster*, n° 7, pp. 143-184.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1990). *Modèle particulière et démarches de modélisation*. Paris, LIRESP- INRP.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1992). Modèle particulière et démarches de modélisation. In Équipe INRP-LIREST (Eds), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- DELATTRE P. & THELLIER M. (Eds) (1979). *Actes du colloque «Élaboration et justification des modèles»*, tome 1. Paris, Maloine.
- DOW W.M., AULD J. & WILSON D.J. (1978). *Pupils' Concepts of Gases, Liquids, Solids*. Dundee, College of Education.
- DURANDEAU J.-P., BRAMAND P., CAILLET D. & COMTE M.-J. (1987). *Sciences Physiques 5e*. Paris, Hachette.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse, Université d'Aix-Marseille II.
- KUBBINGA H. (1983). *Le développement historique du concept de «molécule» dans les sciences de la nature jusqu'à la fin du 18ème siècle*. Thèse, Paris, EHESS.
- LARCHER C., CHOMAT A. & MÉHEUT M. (1990). À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue Française de Pédagogie*, n° 93, pp. 51-61.
- MÉHEUT M. (1982). *Combustion et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième*. Thèse, Université Paris 7.
- MÉHEUT M. & CHOMAT A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, n° 5, pp. 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*. Amiens, IUFM de Picardie, pp. 53-71.
- MÉHEUT M. (à paraître). Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases. *International Journal of Science Education*.
- MICHAUD Y. & LE MOAL Y. (1988). *Sciences physiques 4e*. Paris, Magnard.

- NOVICK S. & NUSSBAUM J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter : an interview study. *Science Education*, n° 62, pp. 273-281.
- PERRIN J. (1903). *Traité de Chimie Physique. Les Principes*. Paris, Gauthier-Villars.
- POSNER G.J., STRIKE K.A., HEWSON P.W. & GERTZOG W.A. (1982). Accomodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, n° 66, pp. 211-227.
- 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*, n° 7, pp. 75-94.
- PULLMAN B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris, Fayard.
- ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1990). Students reasoning in thermodynamics. In P.L. Lijnse et al. (Eds), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*. Utrecht, CDB Press, pp. 36-49.
- 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, Université Paris 6.
- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, n° 1, pp. 13-28.
- Von GLASERSFELD E. (1994). Pourquoi le constructivisme doit-il être radical ? In M. Larochelle & N. Berdnaz (Eds), *Constructivisme et Éducation. Revue des Sciences de l'Éducation*, n° 20, pp. 21-28.
- WALLISER B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris, Seuil.