

## UNE SIMULATION POUR INTRODUIRE UN MODÈLE CINÉTIQUE MICROSCOPIQUE DE GAZ : EFFETS DE LA SECONDE À L'UNIVERSITÉ

Françoise CHAUVET\* et Chantal DUPREZ\*\*

\*IUFM Nord Pas de Calais, \*\* Université de Lille 1  
LDSP Université Denis Diderot - Paris 7  
fchauvet@club-internet.fr, chantal.duprez@univ-lille1.fr

### 1. Introduction

Actuellement, à la fois dans les recherches didactiques et dans la pratique de la classe, on porte davantage d'attention aux activités de modélisation. Les recommandations officielles incitent à utiliser des logiciels de simulation comme outils pour l'apprentissage de la modélisation à tous les niveaux d'enseignement. On peut classer ces outils en deux types selon le mode d'apprentissage qu'ils favorisent : activités « d'exploration » ou de « construction » de modèle (Mellar & Bliss, 1994). De nombreuses simulations (Buty, 2000, Vince & Tiberghien, 2000, Richoux *et al.*, 2002) ou micromondes (Rebmann, 1998) sont utilisés pour explorer des modèles dans divers domaines de la physique. Certaines simulations décrivent des phénomènes complexes qui ne sont pas accessibles à l'observation directe et peuvent aider les utilisateurs à s'en faire une représentation. Des activités de modélisation exploratoire permettent aux élèves d'interagir avec des modèles donnés, de comparer et de confronter les hypothèses qui les fondent avec leurs propres idées. Elles peuvent développer une meilleure compréhension des concepts que les activités quantitatives traditionnelles. Ainsi, les rédacteurs des nouveaux programmes de seconde (B.O. n° 6, 1999 ; GTD, 2000), en s'appuyant sur les résultats de recherches didactiques antérieures, menées au niveau collège (Chomat, Larcher, Méheut 1990, Méheut, 1996) proposent l'appui sur une simulation<sup>1</sup> pour illustrer les deux types de description, macroscopique et microscopique, des propriétés de la matière. L'usage d'une telle simulation suppose l'introduction précoce d'un modèle cinétique particulière pour expliquer les propriétés physiques des gaz. L'introduction de ce modèle, qui semble faire l'objet d'un consensus entre chercheurs et rédacteurs de programmes, mérite d'être questionnée, si l'on veut convaincre les enseignants de possibles bénéfices pour l'apprentissage de leurs élèves. Se pose aussi la question du transfert d'une séquence élaborée à des fins de recherche vers les enseignants de terrain, nécessaires médiateurs entre les concepteurs d'un outil innovant et ses utilisateurs.

Nous cherchons à savoir dans quelle mesure un travail de formation portant sur l'intégration d'un logiciel ciblé permet de transmettre de nouvelles intentions à visée constructiviste et de faire évoluer les pratiques pédagogiques des enseignants. Cette problématique rejoint celle d'une recherche européenne, à laquelle nous avons participé, qui porte sur les réactions d'enseignants devant l'innovation (STTIS, 1998) et a conduit à l'élaboration d'un ensemble de ressources pour la formation des enseignants (STTIS, 2001, Viennot, 2002).

Dans la partie de l'étude que nous présentons, nous étudions la possibilité d'introduire un nouvel environnement didactique dans le cadre d'une pratique habituelle, une séance de TP avec usage de la simulation. Nous analysons d'abord les réactions d'élèves et d'étudiants à ces éléments nouveaux spécifiés. Nous cherchons ensuite à évaluer les apports, et les limites, de

---

1. En collaboration avec le SEMM de Université de Lille 1, la simulation a été réadaptée à la puissance actuelle des ordinateurs.

la simulation pour la construction de concepts aux deux niveaux d'enseignement, secondaire et supérieur. Les résultats de l'analyse fine des bénéfices et des difficultés pour les apprenants, selon le mode de travail et la cohérence dans l'enchaînement des concepts et des activités proposés par l'enseignant, contribuent à enrichir les ressources que nous voulons élaborer pour la formation à une analyse des pratiques de l'enseignement des sciences.

## **2. Les intentions spécifiques du dispositif d'enseignement visé**

Le cadre théorique qui fonde la simulation est celui de la théorie cinétique des gaz parfaits. Pour interpréter les mêmes phénomènes, le physicien dispose de deux modèles. L'un se situe au niveau macroscopique : le modèle du gaz parfait où l'état d'un gaz est décrit par l'équation  $pV = nRT$ . L'autre se situe au niveau microscopique : le modèle cinétique, dans lequel un gaz est décrit par un très grand nombre de particules considérées comme des sphères dures de dimension négligeable, dont le mouvement est régi par les lois de la mécanique newtonienne auxquelles on adjoint des hypothèses statistiques. Nos objectifs pour une séquence d'enseignement intégrant la simulation sont de faire construire par les élèves les notions de pression et de température d'un gaz en introduisant le modèle cinétique et d'utiliser ce modèle pour ses fonctions de prévision et d'explication des propriétés thermo-élastiques des gaz. Le travail conceptuel attendu porte sur la mise en relation de deux niveaux de description des mêmes phénomènes relatifs aux gaz. Fondé sur ces lois, le logiciel produit une image animée, aide à l'exploration du modèle cinétique.

Par rapport à d'autres construits sur le même thème, le logiciel a des particularités qui font écho aux obstacles dont nous visons le dépassement.

- Le mot pression n'est pas affiché sur l'écran de visualisation. Cette notion est à construire par l'utilisateur à partir des effets statistiques et dynamiques des chocs et à relier à la grandeur macroscopique « force par unité de surface ». Seuls les nombres de chocs par unité de surface de paroi, pour une durée donnée, sont affichés. En s'appuyant sur l'association spontanée entre « tassement » des particules (Séré, 1985) et nombre de particules dans le cadre statique, on vise, dans un cadre dynamique, une première approche des forces pressantes à partir des effets des chocs associés à leur fréquence.
- Le choix de simuler deux volumes de gaz séparés par une paroi mobile vise une autre difficulté : la non-prise en compte de la pression atmosphérique considérée comme un état « normal sans pression ». C'est le sens de déplacement de la paroi une fois libérée (ou son maintien à l'équilibre) qui sert d'indicateur pour comparer les pressions de part et d'autre de la paroi. Relier le mouvement de la paroi aux chocs des particules est un passage obligé, favorisé par l'image animée. Les élèves de seconde ignorent la loi de conservation de la quantité de mouvement et le concept d'énergie cinétique. Ils disposent d'une première approche du principe d'inertie, enseignée avant le thème sur les gaz, pour observer le mouvement d'une particule au cours d'un choc ou entre deux chocs. Ils peuvent expliquer en termes de compensation ou de comparaison d'actions mécaniques la mise en mouvement ou l'équilibre de la paroi.
- La masse des particules, variable dans le modèle cinétique, est introduite comme paramètre de la simulation, alors qu'elle reste cachée dans l'équation d'état  $pV = nRT$  liant les variables macroscopiques. Le logiciel permet de simuler des situations où l'égalité des pressions ne correspond pas à une égalité des nombres de chocs, alors que l'association pression et fréquence des chocs est souvent privilégiée par les élèves (Méheut, 1996) ou les étudiants (Rozier, 1988). Dans une telle situation, où se manifeste un raisonnement « une cause, un effet », il faut prendre en compte non seulement la fréquence des chocs, grandeur à caractère spatial, mais aussi la quantité de mouvement échangée, grandeur dynamique qui dépend de la masse et de la vitesse des particules. Rozier (*ibid.*) avait déjà trouvé au niveau universitaire la non prise en compte des aspects dynamiques des chocs.

D'autres situations permettent une approche intuitive de la grandeur physique qui traduit l'efficacité des chocs et que les élèves appellent souvent la « violence » ou la « force » des chocs.

- Le logiciel peut ainsi être un support privilégié pour mettre en scène des situations favorisant une analyse « fonctionnelle » des relations entre variables macroscopiques. Ainsi on peut chercher de quelles variables dépend (ou ne dépend pas) la pression en précisant les sens de co-variation ou de contre variation. Cette étape d'une démarche scientifique mérite d'être travaillée, en privilégiant une approche qualitative de la relation  $pV = nRT$ , relation à plusieurs variables dont on sait les difficultés associées.

La réflexion sur les objectifs d'enseignement se trouve ainsi fortement imbriquée avec un éclairage du contenu et une prise en compte des idées communes et modes de raisonnement des apprenants. Le guidage proposé vise l'implication des apprenants dans la construction de leurs connaissances et s'organise en trois phases :

- Une phase d'exploration du modèle cinétique avec appui sur l'image animée pour faire fonctionner à l'échelle microscopique une analogie mécanique macroscopique. En seconde, il s'agit soit d'imaginer l'effet des chocs, puisque la grandeur physique quantité de mouvement n'est pas disponible, soit de s'appuyer sur les lois déjà introduites, comme le principe d'inertie, pour interpréter le mouvement des particules entre deux chocs (absence d'interaction entre particules) ou la mise en mouvement et le maintien à l'arrêt de la paroi. Le guidage des étudiants de DEUG contient un rappel sur les hypothèses statistiques du modèle. On s'attend à ce que les étudiants utilisent l'image pour vérifier les lois qui fondent la simulation, notamment la différence des vitesses des molécules
- Une phase de mise en situation de conflit cognitif pour déstabiliser les associations privilégiées (vitesse - distance et pression - concentration, Rozier 1988) et les raisonnements communs à une seule variable à la fois, suivie d'une phase de gestion du conflit. Pour expliquer l'effet des chocs, la prise en compte de la seule variable d'espace, ici le nombre de chocs, se révèle insuffisante. Il faut considérer la variable dynamique, ici la « violence » des chocs, ou leur « efficacité », grandeur liée à la quantité de mouvement échangée lors d'un choc, et qui dépend de la masse et de la vitesse des particules.
- Une phase de réinvestissement conduisant aux mises en relation attendues entre variables du modèle microscopique de gaz d'une part et d'autre part entre variables macro et micro à travers des situations diverses simulant des transformations de gaz.

### **3. Méthodes et populations interrogées**

Ces intentions spécifiques pour un guidage de l'activité des apprenants, et l'explicitation de leurs fondements, ont fait l'objet d'un premier travail en formation continue d'enseignants. La trame d'un protocole de TP pour un travail individualisé des élèves devant l'ordinateur a été négociée et élaborée en collaboration entre enseignants de terrain et chercheurs (mai 2001). Cette trame conduit à deux protocoles de même structure dont l'un sert de guide pour une séance de TP avec les élèves de seconde menée par une équipe d'enseignants volontaires (13 classes dans un même établissement) et l'autre pour des étudiants de DEUG (3 groupes).

Pour évaluer la faisabilité d'une démarche nouvelle dans un cadre relativement contraint, nous analysons les réactions d'une classe (P6, N = 27) et d'un groupe d'étudiants de DEUG (N = 27) à partir des réponses écrites au cours du processus d'appropriation de la simulation. Pour déterminer les acquis conceptuels des utilisateurs de la simulation, nous menons une analyse des réponses à des questions de même type, posées aux étudiants juste après l'enseignement et aux élèves six mois après. Pour tenter de séparer les variables et isoler le paramètre « effet de la simulation », nous comparons les réponses de deux groupes d'étudiants ayant tous reçu le même enseignement classique, l'un a suivi une séance de TP

avec la simulation (OUI, N = 33) et l'autre non (NON, N = 21). De plus, pour lisser l'effet « professeur », les élèves ont été interrogés l'année scolaire suivante en 1S (deux classes, N = 62). Ils proviennent des treize classes différentes où l'élément commun de l'enseignement sur le thème des gaz a été l'introduction au modèle cinétique avec appui sur la simulation, selon le même protocole écrit. En effet, nous pensons que la phase de réinvestissement est cruciale pour la construction et la consolidation dans la durée de connaissances nouvelles. Cette phase du travail qui donne cohérence à la construction proposée est souvent menée oralement par l'enseignant avec sa classe. L'étude détaillée des actions précises des enseignants, menée à partir d'observations de classe, fera l'objet d'un autre article.

Nos analyses visent le repérage des éléments qui favorisent la construction conceptuelle ou au contraire ce qui fait obstacle. En raison du nombre limité des populations étudiées, les pourcentages établis n'ont qu'une valeur indicative, facilitant la comparaison.

#### 4. Processus d'apprentissage avec la simulation

Nous étudions successivement, à travers leurs réponses écrites, les réactions des élèves et des étudiants aux questions typiques des deux premières phases de l'appropriation : exploration du modèle, mise en scène d'un conflit cognitif par des demandes de prévision / justification d'un phénomène avant observation puis confrontation avec la simulation.

##### Exploration du modèle

*Encadré 1. Une question pour guider l'observation du mouvement des particules*

Situation simulée : une boîte,  $T = 300 \text{ K}$ , un seul type de particules,  $N = 50$  à  $100$ .

Lancer la simulation :

*Comment se déplacent les particules ? Peut-on observer sur l'écran des différences entre les vitesses des particules ?*

89 % des élèves observent une différence de vitesse : « elles se déplacent dans tous les sens, oui on remarque les différences entre les vitesses des particules », « les particules se déplacent dans toutes les directions, oui il y en a qui vont moins vite que les autres ». Pour les autres, ils se disent incapables d'observer les différences à cause de la rapidité d'affichage, et sans doute aussi du trop grand nombre de particules choisi : « elles se déplacent très rapidement, non nous ne pouvons pas observer les différences entre les vitesses des particules ».

Alors que les étudiants viennent d'avoir un cours sur les hypothèses statistiques du modèle cinétique, 75 % d'entre eux observent dans un premier temps que les particules ont toutes la même vitesse. Seulement 30 % d'entre eux reviennent sur leur réponse initiale en notant une modification de la vitesse au cours d'un choc en référence aux lois physiques : « accélération après le choc », ou « conservation de la quantité de mouvement ».

*Encadré 2. Agitation thermique et température*

Dans les deux simulations suivantes, choisir deux boîtes avec une paroi fixe et laisser la paroi fixe au milieu.

a) Choisir pour chaque boîte : même volume, même nombre et même type de particules (par ex  $N_2$ ), des températures différentes (300 K et 1000 K par ex).

*Comparer la vitesse moyenne des particules dans chaque boîte.*

b) Choisir pour chaque boîte : même température, même volume, même nombre de particules, des types différents de particules (par ex  $N_2$  d'un côté et  $H_2$  de l'autre côté). Valider et lancer la simulation. *Observer. La vitesse dépend-elle de la masse des particules, à  $T$  donnée ?*

Les élèves comme les étudiants constatent que la température choisie détermine la vitesse des particules, laquelle augmente si la température augmente. Pour 60 % des élèves, à

température donnée, les particules de masse plus grande se déplacent à vitesse plus faible : « en effet, les particules de diazote ont une masse plus importante que celles de dihydrogène et on remarque qu'elles vont moins vite ». Pour les étudiants, 50 % se contentent de noter une différence entre les vitesses des particules de H<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub> et 40 % d'entre eux justifient leur réponse par la relation entre masse et vitesse (quadratique moyenne) des particules, à T donnée.

### Mise en scène d'un conflit cognitif

Pour créer une situation de conflit cognitif, on propose d'abord une situation où l'équilibre de la paroi est expliqué à partir de la fréquence des chocs et ensuite une situation où la seule prise en compte de la fréquence des chocs ne permet pas d'expliquer l'équilibre. La première question posée vise à vérifier que l'existence d'une force pressante due aux chocs des particules en mouvement est acquise par tous.

#### Encadré 3. Forces pressantes exercées par les particules en mouvement sur la paroi centrale

Situation où tout est pareil des deux côtés : "Expliquer l'équilibre de la paroi" :

Les élèves expriment l'idée que les molécules en mouvement poussent la paroi de part et d'autre : « la paroi reste inerte, car les forces se compensent », « les particules poussent autant de chaque côté de la paroi ». Un tiers d'entre eux associe ces forces pressantes au nombre de chocs, « il y a le même nombre de chocs des deux côtés, la paroi ne bouge pas » et une moitié au nombre de particules, « les boîtes contiennent un même nombre de particules identiques, il y a équilibre ». La moitié des étudiants expliquent l'équilibre par l'égalité du nombre de chocs, et un tiers par des conditions identiques de part et d'autre, notamment l'égalité des pressions. Ainsi, les élèves associent plus volontiers l'idée de force pressante au nombre de particules, et les étudiants la pression au nombre de chocs par unité de surface de paroi.

La question suivante porte sur une situation où cette seule association se révèle insuffisante.

#### Encadré 4. Questions de prévision et justification avant vérification avec la simulation

Choisir pour chaque boîte : la même température, le même volume, le même nombre de particules, des types différents de particules (par ex N<sub>2</sub> d'un côté et H<sub>2</sub> de l'autre côté)  
Imaginer ce qui va se passer quand on libère la paroi. Vérifier avec le logiciel.

La prévision d'un déplacement est faite par la quasi-totalité des élèves (93%) qui en donnent une justification avant l'observation avec le seul nombre de chocs : « le nombre de chocs sur la paroi est beaucoup plus important chez le H<sub>2</sub> alors que le N<sub>2</sub> reste pratiquement stationnaire », « la paroi va bouger, les particules H<sub>2</sub> ayant plus de chocs ». Dans la recherche d'explication, la moitié des élèves, stimulés par l'échec de leur prévision, « hypothèse fautive, la paroi est équilibrée », prennent en compte la masse des particules comme autre paramètre : « influence de la masse, les particules de droite sont plus grosses » ou amorcent un raisonnement en termes de compensation ou de comparaison : « Le nombre de chocs est compensé par l'effet des chocs », « Elle ne bouge pas, car les chocs de O<sub>2</sub> sont plus durs, plus efficaces », « La paroi ne bouge pas, c'est peut-être à cause de la masse des particules, équilibrant la vitesse pour la poussée ».

On observe deux attitudes chez les étudiants : comme nous l'attendions, deux tiers raisonnent au niveau microscopique en se basant sur la fréquence des chocs et ils donnent une prévision fautive. Un tiers donne une prévision correcte ; leurs commentaires ainsi que des entretiens menés avec des étudiants de licence de Sciences Physiques (Chauvet & Duprez, 2003) montrent que, dans ce cas, ils raisonnent souvent explicitement ou implicitement à partir de la relation  $PV = nRT$  « tout est pareil dans la formule » ou « la formule le dit » en court-circuitant le point de vue microscopique favorisé par la simulation.

Dans leurs commentaires, 78 % des étudiants font intervenir la masse des particules avec l'idée d'une compensation « *la masse compense le nombre de chocs* » ou « *la masse compense la faible vitesse* ». Un seul compare les effets des chocs et introduit la compensation de la fréquence et de la violence des chocs pour obtenir le même effet sur la paroi : « *les chocs sont moins nombreux mais plus violents* ».

Ces réponses écrites au guidage proposé montrent que la mise en scène fonctionne avec les élèves comme avec les étudiants. Une majorité s'implique dans la résolution d'un conflit cognitif et raisonne sur les situations simulées en prenant en compte plusieurs variables simultanément. Toutefois la prise en compte des variables microscopiques se révèle plus difficile pour les élèves : un élève sur deux amorce une explication microscopique quand quatre étudiants sur cinq le font.

### 5. Évaluation des acquis conceptuels

Une même situation relative aux transformations thermoélastiques des gaz a été proposée aux élèves et aux étudiants pour qu'ils en donnent une interprétation microscopique.

- Pour les élèves, nous voulons évaluer, sur le long terme, leurs acquis conceptuels sur pression et température et leurs représentations de ce qui se passe dans un gaz au niveau microscopique. Nous analysons les données à partir des mêmes critères que ceux qui nous ont servi pour faire un état des lieux en seconde avant enseignement (Chauvet & Douay, 2002). En recherchant des indices d'une évolution entre un « avant » et un « après » enseignement avec la simulation, nous voulons savoir :

- si les prévisions et les raisonnements des élèves dans l'analyse des situations sont plus pertinents après qu'avant ;
- dans quelle mesure le modèle cinétique joue un rôle dans l'explication des phénomènes ?
- quels sont les éléments du modèle cinétique intégrés par les élèves et les variables associées aux grandeurs pression et température ?

Nous limitons ici l'analyse des résultats à la question portant sur une situation de chauffage d'un gaz. L'enquête avant enseignement a montré que les difficultés des élèves à propos des situations où intervient une variation de température sont plus grandes que dans les situations de variation de pression.

- Pour les étudiants, nous présentons une analyse comparative des arguments utilisés dans leurs réponses par les étudiants ayant suivi ou non la séance de TP avec la simulation.

#### Acquis conceptuels des élèves, dans le long terme

La question posée aux élèves de deux classes de 1S (N = 62) porte sur un ballon contenant de l'air<sup>2</sup>, fermé par une goutte de liquide mobile dans un tube horizontal ; l'air, initialement à 0°C se réchauffe jusqu'à la température ambiante. On demande de prévoir le sens de déplacement, puis d'expliquer le déplacement et l'équilibre de la goutte à l'aide des interactions entre molécules d'air et la goutte.

- Les élèves prévoient correctement le sens de déplacement de la goutte lors du réchauffement du ballon avec une nette amélioration de la prévision du phénomène après enseignement (78 % contre 40 %, voir tableau 1). On note que la grande majorité des réponses (81 %) ne prend en compte que le seul gaz enfermé dans le ballon qui subit la transformation dans un raisonnement du type « une cause, un effet ».
- Quelques réponses (11 %) prennent en compte les deux côtés en notant une différence de température (ou de pression) à l'origine du déplacement de la goutte et 24 % le font avec

---

2. Documents d'accompagnement des programmes de Physique de la classe de seconde (p. 170)

l'égalité des températures (ou des pressions) lorsque la goutte est à l'arrêt. L'enseignement améliore le taux de réponses correctes, sans changement notable du mode de raisonnement des élèves.

Tableau n° 1 : Arguments sur le déplacement et l'équilibre de la goutte

	Avant N = 198	Après N = 62
Prévision correcte du sens de déplacement	40 %	78 %
- Prise en compte d'un seul côté (déplacement)	70 %	81 %
- Prise en compte des deux côtés (déplacement)	5 %	11 %
Prise en compte des deux côtés à l'équilibre	12 %	24 %

- Nous constatons une grande place donnée au point de vue macroscopique dans les justifications. Bien que la question porte explicitement sur les interactions entre les particules et la goutte d'eau, 40% des élèves ne reprennent jamais les termes « particules » ou « molécules » dans leurs explications. Ceux qui font intervenir des particules (60%) le font toujours en complément d'explications prenant en compte des variables macroscopiques.
- Dans leurs explications au niveau macroscopique (90%) (voir tableau n° 2),
  - 40% des élèves attribuent la cause du déplacement au seul chauffage : « *le gaz se réchauffe et ça pousse la goutte* ». Certains l'associent à une variation de température : « *car la température ambiante est supérieure à 0° C* » ou « *la goutte avance jusqu'à ce que la température soit la même partout* ».
  - 31% des élèves explicitent une relation entre température et volume : « *le volume dépend de la température* », « *Le gaz occupe de plus en plus de volume, exerce une force sur les parois du ballon et pousse la goutte* », « *si le gaz se réchauffe, la température augmente, donc il prend plus de place et il pousse la goutte* ».
  - 19% des élèves mentionnent une différence de densité entre l'air chaud et l'air froid, à l'origine d'un mouvement : « *l'air froid étant plus lourd que l'air chaud, il pousse la goutte vers l'extérieur* », proportion comparable à celle obtenue avant enseignement (18%).

Tableau n° 2 : Argumentation de type macroscopique

	N = 62	
Arguments de type macroscopique	56	90 %
Chauffage cause du déplacement	25	40 %
Relation volume température	19	31 %
Différence de densité entre l'air chaud et l'air froid	12	19 %

- Dans les réponses des élèves qui invoquent des molécules (60 %) avec des arguments non exclusifs (voir tableau n° 3), l'idée d'agitation thermique est présente : « *les particules s'échauffent, donc elles s'agitent, le volume augmente* ».
  - 32 % expriment l'idée de mouvement des molécules à l'origine de forces pressantes sur les parois : « *les particules percutent la paroi et augmentent la pression* » ou « *les particules d'air poussent sur le verre et sur la goutte* ».
  - L'agitation des molécules est rarement (5 %) liée à la grandeur physique « vitesse » moyenne des molécules : « *les particules qui sont dans le ballon et celles de l'air ambiant se déplacent à la même vitesse, les particules poussent également de chaque côté de la goutte* ».
  - 39 % associent de façon privilégiée l'agitation à l'espace : « *quand les particules d'air ont envahi l'espace nécessaire, la goutte s'arrête* ». Dans ces réponses, 13 % sont compatibles avec l'idée d'une absence d'agitation thermique à 0°C : « *à 0°C, les particules ne bougent pas et occupent un tout petit volume. En se réchauffant, elles vont bouger et occuper plus de place* » ou « *les particules s'excitent, elles s'écartent les unes des autres et commencent à s'agiter progressivement* ».

Tableau n° 3 : Argumentation de type microscopique

	N = 62	
Invocation des molécules *	37	60 %
Mouvement des molécules et forces pressantes	20	32 %
Agitation et vitesse	3	5 %
Association privilégiée entre agitation et espace dont absence d'agitation à 0°C	24 8	39 % 13 %

\* les catégories ne sont pas exclusives

- Nous relevons dans les réponses d'autres difficultés.
  - L'introduction d'une relation de causalité, là où elle n'a pas lieu d'être : « les particules s'agitent et provoquent une augmentation de la température » ou « les chocs dégagent de la chaleur ».
  - Enfin les particules elles-mêmes se voient attribuer les propriétés macroscopiques des gaz : « la chaleur entraîne une dilatation des particules » ou « il y a dilatation des particules qui s'agitent ».

Toutes difficultés confondues, c'est plus de 40 % des élèves interrogés (N = 62) qui introduisent des éléments erronés dans la représentation qu'ils se font du phénomène d'agitation thermique.

Six mois après enseignement, l'image du mouvement des molécules est encore présente chez une majorité des élèves et disponible pour un tiers d'entre eux dans une explication qui associe les effets des chocs des molécules aux forces de poussée sur les parois. L'introduction du modèle cinétique avec la simulation a favorisé des représentations en termes d'actions des particules sur les parois, y compris à l'équilibre.

Par contre, le lien entre l'agitation thermique des particules et la grandeur température reste très difficile à établir pour les élèves, la vitesse étant rarement la variable retenue. L'utilisation de la simulation et le guidage proposé aux élèves pour qu'ils construisent le concept de température ne sont pas suffisants pour qu'ils effectuent le saut cognitif attendu : passer des conceptions communes sur chaleur et température à l'association température et vitesse des particules. La construction de cette nouvelle connaissance, introduite avec la simulation et non stabilisée en seconde, ne peut s'envisager que dans la continuité et en relation avec le concept d'énergie cinétique introduit en première.

### Acquis conceptuels des étudiants, avec et sans la simulation

Une question a été posée à 54 étudiants, dont 33 ont fait la séance (repérés par OUI) et 21 ne l'ont pas faite (repérés par NON). Elle porte sur le chauffage progressif, à la pression atmosphérique, d'un gaz parfait enfermé dans un récipient fermé par une paroi mobile. Dans le but de tester si les étudiants font intervenir à la fois le nombre de chocs et la « violence » des chocs dans leur conception de la pression, il est demandé de proposer une explication à l'échelle microscopique du déplacement de la paroi.

Nous présentons une analyse comparative des arguments utilisés par les étudiants OUI et par les étudiants NON pour expliquer le déplacement de la paroi (voir tableau n° 4). Les catégories ne sont pas exclusives. Toutes les réponses des étudiants concernent la phase initiale où la paroi se met en mouvement.

- 51 % des étudiants OUI expliquent le déplacement de la paroi à partir de l'effet des chocs des molécules sur la paroi par un raisonnement du type : la température augmente  $\Rightarrow$  la vitesse des molécules augmente  $\Rightarrow$  l'effet des chocs sur la paroi augmente  $\Rightarrow$  déplacement.
  - 33 % allient la fréquence et la violence des chocs : « les particules ont une vitesse quadratique plus grande et « frappent » plus souvent et plus fort la surface du piston. »



- 18 % n'argumentent qu'à partir du nombre de chocs sur la paroi qui augmente : « Les molécules ont une vitesse quadratique supérieure à celle de l'extérieur... Il y aura plus de chocs sur la partie gauche de la paroi. »

24 % des étudiants NON argumentent à partir de l'effet des chocs des molécules sur la paroi : « Comme la température augmente, la vibration des molécules se fait plus importante et les chocs contre la paroi du piston mobile font déplacer celui-ci ». Parmi eux, un étudiant argumente à la fois à partir de la fréquence des chocs et de l'efficacité des chocs.

- 18 % des étudiants OUI et 33% des NON invoquent le nombre de chocs entre les molécules, l'augmentation des chocs ou l'agitation y associant éventuellement une augmentation de la pression sans préciser que les chocs ont lieu sur la paroi : « Le nombre de chocs entre molécules s'amplifie, d'où le piston se déplace ».

- 24 % des étudiants OUI et de 43% des étudiants NON, tout en citant pour la plupart l'agitation des molécules, ont en fait une argumentation que l'on peut qualifier de macroscopique. Soit ils disent de façon correcte que le volume augmente : « Les molécules vont bouger plus vite et d'après la relation  $PV = nRT$ , (on a  $P_{ext}$ ,  $n$  et  $R$  qui sont constants) le volume va augmenter ( $T' > T \Rightarrow V' > V$ ) », soit de façon incorrecte que la pression augmente : «  $PV = nRT$ , si la température augmente, la pression augmente... Si la pression augmente, ainsi que la température, l'agitation thermique moléculaire augmente aussi qui provoque le déplacement du piston. »

- 52 % des NON et un seul des OUI associent de façon privilégiée l'agitation au volume : la température augmente  $\Rightarrow$  l'agitation augmente  $\Rightarrow$  les molécules ont besoin de plus de volume  $\Rightarrow$  déplacement : « La vitesse quadratique des molécules augmente, les molécules ont besoin d'un plus grand espace pour pouvoir se déplacer librement et obtenir l'équilibre. »

Tableau n° 4 : Analyse comparative des justifications du déplacement de la paroi

	OUI N = 33		NON N = 21	
	Effet des chocs sur la paroi dont "fréquence et violence"	<b>17</b> 11	51 % 33 %	<b>5</b> 1
Chocs entre molécules ou agitation	<b>6</b>	18 %	<b>7</b>	33 %
Raisonnement macroscopique basé sur la variation de la pression ou du volume	<b>8</b>	24 %	<b>9</b>	43 %
Les molécules du fait de leur agitation ont besoin de volume	<b>1</b>	3 %	<b>11</b>	52 %

- Nous examinons également la relation que font les étudiants entre la température et le déplacement des molécules dont la vitesse quadratique moyenne est proportionnelle à la racine carrée de la température (voir tableau n° 5). Nous constatons à nouveau une différence entre les réponses des étudiants OUI et des NON. 64 % des étudiants OUI et 19 % des NON disent que la vitesse des molécules augmente lorsque la température augmente. 24 % des étudiants OUI et 52 % des NON sont moins précis et parlent seulement de l'agitation des molécules. 9 % des étudiants OUI et 24 % des NON ne donnent aucune précision sur le lien entre le mouvement des molécules et la température.

Tableau n° 5 : Analyse comparative de la relation entre vitesse des molécules et température

	OUI N = 33		NON N = 21	
	T augmente $\Leftrightarrow$ vitesse augmente	<b>21</b>	64 %	<b>4</b>
T augmente $\Leftrightarrow$ agitation augmente	<b>8</b>	24 %	<b>11</b>	52 %
Absence de lien entre température et mouvement des molécules	<b>3</b>	9 %	<b>5</b>	24 %

La comparaison que nous avons effectuée des réponses des étudiants OUI et NON montre une différence hautement significative ( $\chi^2 = 26,5$   $p < 0,01^3$ ) entre les réponses des étudiants OUI et des étudiants NON. Nous constatons que l'utilisation du logiciel permet une meilleure compréhension de ce qu'est la pression cinétique. Les explications des étudiants ayant suivi la séquence sont mieux argumentées, notamment par la prise en compte simultanée de variables microscopiques (nombre de chocs sur la paroi et « efficacité ») pour expliquer le déplacement du piston dû à une augmentation de la température (33% oui et 5% des non). Les NON prennent seulement en considération la fréquence des chocs ou des considérations de volume. Les étudiants OUI ont également une meilleure compréhension du lien entre la température et la vitesse des molécules.

## 6. Conclusion

Les évaluations que nous avons réalisées permettent d'affirmer que le mode de travail proposé, lorsqu'il est repris dans ses grandes lignes par les enseignants qui ont mis en œuvre une séquence d'enseignement avec la simulation, contribue à l'implication des élèves et des étudiants dans des activités qui donnent sens aux concepts et favorisent l'acquisition de connaissances nouvelles.

Pour les étudiants, le bénéfice d'un usage de la simulation est manifeste : ils acquièrent une meilleure compréhension des relations entre les variables qui décrivent l'état d'un gaz, aux niveaux microscopique et macroscopique. La simulation du modèle cinétique est une aide pour la conceptualisation des grandeurs pression et température. Dans leurs explications des phénomènes, les étudiants qui l'ont utilisée se réfèrent davantage au modèle, et d'une façon mieux argumentée.

Pour les élèves, l'analyse des résultats doit tenir compte du délai entre l'utilisation de la simulation en fin d'année scolaire et le questionnaire passé six mois après. Nous notons des évolutions significatives après enseignement avec la simulation, sans pouvoir dire quel élément plutôt que tel autre se révèle l'élément déclencheur pour l'apprentissage, simulation et/ou actions précises de guidage par l'enseignant. Concernant la pression, la représentation mentale construite par les élèves à partir des effets des chocs visualisés sur la paroi les aide incontestablement à envisager l'aspect dynamique des chocs, y compris à l'équilibre de la paroi. L'approche du concept de température par le modèle cinétique génère, comme toute connaissance nouvelle, des conceptions fausses fondées sur les modes de raisonnement commun. L'association privilégiée entre agitation thermique et espace remplace dans le cadre dynamique celle de pression et tassement. Peut-on considérer qu'il y a eu une avancée et que la notion d'agitation thermique est prête à être réinvestie à propos du concept d'énergie cinétique en première ? La question est en débat avec les enseignants qui s'étaient déclarés globalement satisfaits de cette approche avec leurs élèves.

La sensibilisation des enseignants aux difficultés nouvelles que soulève l'introduction du modèle cinétique pour les élèves de seconde paraît nécessaire pour qu'ils en tiennent compte dans leur guidage. Donner la possibilité aux élèves de confronter les hypothèses du modèle avec leurs propres idées nécessite une vigilance accrue des enseignants autant pour adapter la rigueur du contenu aux difficultés prévisibles des élèves que pour rendre cohérent l'enchaînement des questions et des actions d'un guidage vers une représentation plus proche du modèle physique dont on vise la construction.

---

3. Les fréquences qui ont servi au calcul du  $\chi^2$  sont repérées par des chiffres gras dans les tableaux 4 et 5.

**Bibliographie**

- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1999). Physique-Chimie, Classe de seconde, *Bulletin officiel*, n° 6 hors série du 12 août 1999, p. 7-23.
- BUTY, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, Université Lyon II, UMR GRIC.
- CHAUVET, F. & DOUAY, M.-B. (2002). *Difficultés des élèves de seconde à propos des gaz*. Rapport de recherche, IUFM Nord - Pas de Calais.
- CHAUVET, F. & DUPREZ, C. (2003). Environnement d'apprentissage fondé sur une simulation : appropriation par les enseignants stagiaires d'IUFM. Communication proposée aux 3<sup>èmes</sup> rencontres de l'ARDIST. Toulouse.
- CHOMAT, A., LARCHER, C., MÉHEUT, M. (1990). *Modèle particulière et démarches de modélisation*. LIREST-INRP.
- GROUPE TECHNIQUE DISCIPLINAIRE, (2000). Document d'accompagnement des programmes, Physique, classe de seconde. Paris : CNDP.
- MÉHEUT, M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia*, 8, 75- 96.
- MELLAR, H. & BLISS, J. (1994). Introduction : Modelling and Education. In H. Mellar, J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn & C. Tompsett (Eds), *Learning with artificial worlds : computer based modelling in the curriculum* (pp. 1-7). London : The Falmer Press.
- RICHOUX, B., SALVETAT, C., BEAUFILS, D. (2002). Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions, *BUP*, 842, Vol. 96, 497-521.
- REBMANN, G. (1998). *Investigation of actual use of informatic tools by science teachers : the French case*. STTIS National Report on W.P.1.2.
- ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7, L.D.P.E.S.
- 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 proposition de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution*. Thèse, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6.
- STTIS Consortium (1998). WP0 Outline and justification of research methodology. Hyperlink : <http://www.uab.es/sttis.htm>.
- STTIS Report (WP5), COLIN, P., CHAUVET, F., HIRN, C., REBMANN, G. et VIENNOT, L. (2001). *Formation des enseignants : des ressources pour la construction de séquences*. Hyperliens : <http://www.uab.es/sttis.htm> et [http://www.ccr.jussieu.fr/ldsp/sttis\\_p5/index.htm](http://www.ccr.jussieu.fr/ldsp/sttis_p5/index.htm).
- VIENNOT, L. (2002). *Enseigner la physique*. Bruxelles : De Boeck.
- VINCE, J. & TIBERGHEN, A. (2000). Simuler pour modéliser. Le cas du son. *Sciences et techniques éducatives*, 2, vol. 7, 333-366.