

Note 81 : Approche mesoscopique, la pression dans un fluide

VIENNOT L. (2002) *Enseigner la physique*, De Boeck, Bruxelles, chapitre 3. Sur l'étude de BESSON, voir le même ouvrage, chapitre 3.

[Voir le document ci-après.](#)

CHAPITRE

3

Pression dans un fluide en présence de gravité Une approche mésoscopique

En collaboration avec Ugo Besson, auteur principal de l'étude¹

SOMMAIRE

1. QUESTIONS SUR LES MÉRITES DU « MICROSCOPIQUE »
2. LE NIVEAU MACROSCOPIQUE : CE QUE LES QUANTITÉS « DOIVENT » ÊTRE
3. STATISTIQUE DES FLUIDES : APPROCHES COMMUNES CHEZ LES ÉTUDIANTS
4. UNE PROPOSITION POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA STATIQUE DES FLUIDES
 - Principes de construction
 - La mécanique des balles de mousse
 - Analogie entre liquide et balles de mousse
 - Débats finaux en petits groupes
5. ÉLÉMENTS D'ANALYSE DE LA SÉQUENCE : LIGNES D'ATTENTION
6. ÉVALUATION DE LA SÉQUENCE AUPRÈS D'ÉTUDIANTS
 - Dispositif expérimental
 - Évaluation externe : pré-test et post-test
 - Les débats entre étudiants
 - Bilan de l'évaluation menée auprès des étudiants
7. RÉACTIONS D'ENSEIGNANTS
8. CONCLUSION

¹ L'expérimentation a été menée en collaboration avec Jacques Lega, Université de Louvain-la-Neuve.

1

QUESTIONS SUR LES MÉRITES DU « MICROSCOPIQUE »

On n'emploie pas sans crainte le terme de « modèle » tant il a fait couler d'encre. Pourtant il s'est discrètement introduit ici ou là dans le texte qui précède, avant tout pour signaler la distance qui sépare un élément construit de description du réel, d'une part, d'un objet ordinaire, de l'autre. Très vite dans les essais de définition un peu plus élaborée du terme modèle, celui de théorie ou l'adjectif correspondant font leur apparition, car on n'imagine pas un objet pour ne rien en faire, et c'est une théorie qui est alors convoquée, comme on dit maintenant. Il s'agira ici de modélisation pour l'étude des fluides à l'équilibre en présence de gravité, et la théorie associée sera dans le cadre newtonien, qu'il s'agisse d'une analyse statique ou cinétique, ce dernier aspect adjoignant une approche statistique à l'étude de la dynamique des particules impliquées.

Nous l'avons dit plus haut, l'analyse du contenu et celle des approches communes chez les élèves sont deux sources incontournables pour élaborer un projet d'enseignement qui ait quelque chance d'être adapté à la fois au public et aux objectifs visés.

Admettons, sans autre détail pour l'instant, que l'étude des fluides liquides ou gazeux pose problème aux élèves.

Dans la communauté des chercheurs en didactique comme chez des personnes actuellement en charge de rédiger les programmes, en France notamment², il semble que l'on ne conteste guère l'intérêt d'initier des adolescents à un modèle particulière de type microscopique, impliquant du vide entre les particules considérées³.

Le statut d'une telle approche ne va pas de soi : introduction du modèle particulière de la théorie cinétique comme objet de connaissance en soi, outil pour une meilleure compréhension de phénomènes macroscopiques, prétexte à initier à une démarche de modélisation, ou encore association de deux ou trois de ces éléments ?

C'est avant tout dans la perspective de fournir un outil de compréhension de phénomènes macroscopiques que l'analyse et la proposition présentées ici ont été élaborées. Par là même, celles-ci visent une initiation à une démarche de modélisation, laquelle ne s'identifie pas à l'introduction d'un modèle particulier. Dans le cas d'un modèle microscopique

² Voir le programme de Seconde lancé en 2000 : MEN 1999.

³ Selon les propositions, le mouvement des particules est introduit ou non d'emblée. Voir par exemple Brook *et al.* 1984, Larcher, Chomat & Méheut 1988, Andersson & Bach 1996, Vollebregt 1998.

avec considération de la cinétique particulaire, il peut y avoir risque de confusion entre deux objectifs, celui d'introduire l'*existence* de particules dont on dira bien vite qu'elles sont des molécules – va-t-on en douter ? –, et la mise en œuvre à fins explicatives d'un modèle. Plus précisément, il peut arriver que l'intérêt du second aspect, en termes d'efficacité pédagogique, soit implicitement déduit de la valeur générale d'un modèle adopté dans la communauté scientifique⁴.

Or, en tant qu'outil théorique d'explication, un modèle particulaire avec du vide entre les particules considérées est susceptible de poser problème à des débutants en science. En l'absence de considération du mouvement des particules, un tel modèle semble déjà propre à l'analyse de la compressibilité des fluides⁵, mais alors se présente la question de la résistance à la compression, laquelle, comme chacun sait, ne commence pas avec un soudain « contact » entre particules immobiles. Si maintenant on introduit la cinétique des particules en espérant que les élèves s'approprient cet aspect, non pas comme objet de connaissance en soi mais comme un moyen de comprendre et donc prévoir des phénomènes impliquant des fluides, alors il ne faut pas sous-estimer les difficultés. « Passer au niveau microscopique », comme on le dit souvent, constitue non seulement un changement d'échelle dans l'analyse, mais aussi et surtout un changement complet dans le type d'explication et dans le rapport de celle-ci au temps. Un effet permanent – les forces d'interaction entre gaz et paroi – est lié à des événements⁶ dont on n'envisage pas la durée⁷, à savoir des collisions entre molécules, celles du fluide et celles de la paroi. Ce n'est que par une approche statistique que l'on peut concilier ces deux types de déroulement temporel. Le moins que l'on puisse dire est que cette gymnastique conceptuelle n'est pas d'une évidente accessibilité et l'on peut attendre quelques difficultés, surtout au niveau de l'enseignement secondaire. De plus, la transmission de l'information physique, si l'on peut dire, entre particules lors d'une perturbation constitue un objet dont la compréhension tient de l'exploit conceptuel. D'ailleurs, à la date où s'écrit ce livre, soit après quinze ans d'expérimentations diverses, aucune

4 On pourrait dire la même chose de l'analyse du frottement en termes mésoscopiques, à savoir via les aspérités des surfaces, si précisément on ne se souciait pas d'examiner les effets de propositions d'enseignement utilisant cet aspect : voir le chapitre 2.

5 Voir note 3.

6 C'est du moins comme cela qu'on les désigne souvent. Dans son effort pour distinguer le niveau des « objets et des événements » de celui des « théories et modèles », Tiberghien (1997) ne précise pas jusqu'où cette distinction est praticable, dès lors que l'on ne se situe plus à un niveau macroscopique. Chacun sait qu'en physique des particules élémentaires, par exemple, le terme d'« événement » est couramment employé à propos de collisions, terme lui-même identique à celui qui désigne le choc entre deux boules de pétanque. De même, la question titre du livre de Diu (1997) : « Les atomes existent-ils vraiment ? » laisse dubitatif sur l'intérêt d'un acharnement à nier le statut d'objet à ces constructions de l'esprit qui néanmoins sont, pour dire vite, « photographiables » et que l'on cherche à « immobiliser », etc.

7 En revanche intervient leur fréquence, c'est-à-dire le nombre de tels événements par unité de temps.

d'entre elles n'établit encore de façon très convaincante les mérites d'une telle approche pour une meilleure compréhension des propriétés thermo-élastiques des gaz, alors même que la gravité n'est pas prise en compte dans ces travaux. Si maintenant, soucieux d'un minimum de compatibilité entre les intérêts éventuels des élèves pour leur environnement et ce qu'on leur enseigne, on cherche à introduire l'action de la gravité, il est bien difficile à un niveau élémentaire d'aborder, muni d'un modèle microscopique, les questions suivantes : pourquoi les molécules de l'atmosphère ne s'entassent-elles pas toutes lamentablement au sol, malgré toute cette place qu'il y a entre elles, pourquoi, si elles ne le font pas, n'ont-elles pas la même densité à diverses altitudes, pourquoi certaines planètes n'ont-elles pas d'atmosphère ? Quant aux liquides, des questions analogues ne sont pas moins redoutables s'il faut considérer à la fois un vide interparticulaire, certes très réduit par rapport au cas des gaz, les interactions et la cinétique moléculaires⁸.

Il semble que ne pas mettre en question l'opportunité d'introduire un modèle microscopique à des fins explicatives reviendrait à penser que puisque les molécules « existent » tout va s'éclaircir en en parlant, la valeur explicative découlant en quelque sorte d'un théorème d'existence⁹.

Que proposer donc si l'on remet en question non pas la validité de la théorie cinétique des fluides, ni la puissance des modèles particuliers microscopiques pour une explication unifiée des phénomènes physiques, mais leur valeur explicative pour des physiciens en herbe à propos d'un champ particulier d'intervention ?

Le « tout macroscopique » n'apparaît pas non plus, *a priori*, comme sans inconvénient.

8 À température donnée, la théorie classique pose, via le théorème d'équipartition de l'énergie, que, pour un corps pur donné en équilibre thermodynamique à température donnée, la distribution des vitesses est la même quelles que soient les interactions entre particules, (voir par exemple Diu *et al.* 1989, p. 303), donc la contribution à la pression associée au mouvement des particules est la même dans un corps pur à l'équilibre à température donnée, que ce corps soit sous forme solide, liquide ou gazeuse.

9 Certains travaux de recherche mentionnés en note 3 sont explicitement partis sur des bases différentes, en cela que les élèves se voyaient proposer un « germe de modèle » pour les gaz, l'objet de l'interaction didactique étant de les amener à en comprendre le fonctionnement puis à l'enrichir. Mais le germe en question impliquant un vide interparticulaire et ne comportant pas d'aspect cinétique est à la fois proche du modèle microscopique admis en physique classique et impuissant à rendre compte d'un phénomène aussi manifeste que la résistance des fluides gazeux à la compression. Le développement du modèle vers l'introduction de l'aspect cinétique (Méheut *et al.* 1994, Méheut 1996, 1997) rejoint le modèle microscopique admis.

2

LE NIVEAU MACROSCOPIQUE : CE QUE LES QUANTITÉS « DOIVENT » ÊTRE

On l'a vu plus haut à propos du frottement, il ne suffit pas qu'il « faille », du fait de la seconde loi de Newton, une force comme ceci ou comme cela pour que les étudiants en acceptent l'idée : « la force, il la faut bien..., mais... ». L'hydrostatique est le lieu de conflits analogues, explicites ou tacites, entre ce que « doit » être la force et ce que l'on veut bien admettre qu'elle soit. La relation $\Delta p = -\rho g \Delta h$ (en notations habituelles) permet de satisfaire la deuxième loi mais non le désir d'explication des étudiants. Comment une situation hydrostatique conforme à cette loi s'établit-elle, comment le système réagit-il à une perturbation pour se remettre à nouveau en conformité ? Les réactions d'étudiants que nous allons rapporter plus loin montrent toute la difficulté qui reste attachée à ces questions tant qu'on arbore uniquement la relation macroscopique fatidique. Remarquons que l'on retrouve ici les mêmes questions qu'à propos des bilans d'énergie : comment une serre en vient-elle à respecter, en régime permanent de non-équilibre, un bilan d'énergie équilibré ?¹⁰

Autant ne pas faire attendre davantage la solution que nous proposons, qui situe l'analyse à un niveau mésoscopique, c'est-à-dire intermédiaire entre les niveaux macroscopique et microscopique, ceci en cohérence avec les arguments qui viennent d'être développés. Mais avant d'en expliciter les modalités, voici plus de détail sur les difficultés effectives des élèves et étudiants susceptibles d'être concernés par cette proposition, laquelle est utilisable *a priori* dans l'enseignement secondaire comme au niveau du début de l'université.

¹⁰ Le chapitre 5 du livre *Raisonnement en Physique* (Viennot 1996, en anglais : 2001) analyse cette absence de valeur explicative des bilans, en relation avec la structure préférentielle, « linéaire causale », du raisonnement commun.

3

STATIQUE DES FLUIDES : APPROCHES COMMUNES CHEZ LES ÉTUDIANTS

Deux entrées ont orienté l'essentiel des études sur les raisonnements d'étudiants susceptibles d'intervenir à propos de la statique des fluides : les états de la matière et leur modélisation particulière d'une part, la phénoménologie macroscopique des liquides en présence de gravité, de l'autre. En quoi les résultats informent-ils notre proposition ?

Les recherches du premier type amènent à constater, passés les stades tout à fait précoces de dénégation du rôle de l'air « immobile »¹¹ et outre les simplifications de l'analyse causale commune¹², la fréquence d'une focalisation exclusive sur ce que l'on pourrait appeler « la géométrie de la pression ». Pour dire vite, la pression, c'est le tassement, à en juger par les commentaires communs¹³. L'associer au « nombre de chocs » constitue une version plus élaborée, mais où il manque encore la dynamique de ces événements – les collisions – dont seule compterait la fréquence¹⁴. L'explication de la diffusion, souvent avancée comme bénéfice d'une modélisation de la cinétique microscopique, peut fort bien rester encore limitée au registre spatial – un déplacement – et c'est sans doute pour cela qu'elle ne pose pas de problème majeur aux élèves. On le voit, l'approche commune de la structure particulière de la matière ne fait pas autant de place qu'on pourrait le croire à cet ingrédient critique de la théorie cinétique des gaz : la dynamique des chocs. Il semble qu'après enseignement du modèle particulier admis, l'analyse commune reste dans le registre explicatif habituel et que seules les descriptions du « tassement » et de la diffusion aient évolué, ceci en restant toujours dans le registre géométrique ou cinétique.

11 Ainsi, pour les plus petits (Piaget & Inhelder 1955, Piaget & Garcia 1971, Séré 1982) l'air n'est pas une substance permanente, il n'existe que quand il est en mouvement, comme s'il était créé ou produit par les actions du sujet ou par les autres objets. Séré (1986) suggère ainsi que l'idée de vent puisse être plus primitive que celle d'air. Pour beaucoup d'élèves du collège, les gaz n'exercent des actions que si l'on exerce une action sur eux ou encore si on les chauffe. Souvent à l'air atmosphérique, dit *normal*, est attribuée une pression nulle. Il n'est pas exclu que ces difficultés subsistent en Seconde (Jacquot 2000).

12 Andersson 1986, Rozier 1988, Rozier & Viennot 1991, Viennot 1996.

13 On serait bien en peine d'expliquer, à l'aide du seul « tassement » des molécules, que la pression dans une montgolfière soit au moins égale à la pression extérieure, ceci au voisinage d'un même point de l'enveloppe. Sur les méfaits du raisonnement à une seule variable, voir notamment Viennot 1996, chapitre 5.

14 Voir l'étude de Rozier au niveau universitaire (références : note 12).

Quant aux études sur les difficultés associées à la statique des fluides en présence de gravité, elles mettent clairement en évidence, par défaut, la difficulté de considérer à la fois les aspects macroscopiques et microscopiques du problème. L'aspect macroscopique est principalement considéré, et cela dans le cas des liquides.

Les premières enquêtes sur les raisonnements d'élèves à propos de la pression dans les liquides¹⁵ ont rapidement établi que la plupart des élèves pense, correctement, que la pression augmente avec la profondeur. Mais, pour presque la moitié de l'effectif dans les populations interrogées, la pression dépend aussi du volume total du liquide : elle serait donc plus grande dans un récipient plus large, agissant essentiellement vers le bas, ou bien étant plus forte « vers le bas » que « sur le côté ». Il se pourrait bien que les élèves appliquent aux liquides leur expérience des solides, pour lesquels « *le poids agit verticalement vers le bas* »¹⁶, une idée qui va souvent avec une non-différentiation entre pression et force¹⁷. L'isotropie de la pression, on s'en doute, pâtit dans l'affaire.

Plusieurs questionnaires d'une enquête récente¹⁸ donnent une idée de l'importance des aspects de raisonnement décrits plus haut dans les réponses d'élèves plus âgés, français et italiens en fin d'enseignement secondaire et d'étudiants universitaires en Belgique.

Ainsi le questionnaire « des récipients » (encadré 3.1) est l'occasion de mesurer la difficulté qu'il y a à raisonner spécifiquement sur la pression pour évaluer la force exercée sur le fond horizontal, d'aire identique, de plusieurs récipients de forme différente, remplis à même hauteur. Outre la nécessité de s'affranchir du poids total du liquide, les parois surplombantes d'un des récipients posent le problème de hauteurs d'eau inégales au dessus des divers points du fond, imposant ainsi un emploi réfléchi de la fatidique formule $\Delta p = -\rho g \Delta h$: la contribution des parois obliques à la compression du liquide est à considérer. La consultation d'étudiants en première année universitaire¹⁹, après un cours magistral sur l'hydrostatique, montre bien que ce stade de compréhension n'est pas majoritairement atteint. Seulement un tiers des étudiants (33 %, N = 458) répond correctement que la force en question est la même dans les trois cas présentés, tandis que presque tous les autres (59 %) considèrent qu'elle est plus grande pour le récipient à parois évasées : « la pression n'est pas la même en tous les points du fond, la hauteur d'eau au-dessus n'est pas la même » répondent-ils souvent, quand ce n'est pas simplement un commentaire du type : « il y a plus d'eau dans ce récipient (c) ».

15 Engel & Driver 1985, Giese, P.A. 1987, Besson 1990 et 1995, Kariotoglu & Psillos. 1993, Kariotoglu *et al.* 1995.

16 Engel & Driver 1985, Kariotoglu & Psillos. 1993.

17 Kariotoglu *et al.* 1995.

18 Besson 2001, Besson *et al.* 2001a, 2001b.

19 À l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

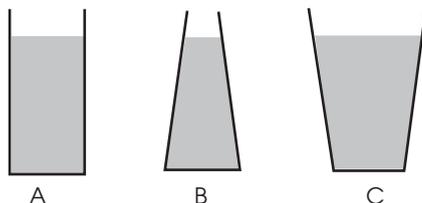
ENCADRÉ 3.1

Le questionnaire des récipients

Dans les trois récipients de la figure, il y a de l'eau, jusqu'au même niveau.

La force que l'eau exerce sur le fond du récipient est

- a) égale dans les trois récipients
- b) plus grande dans le récipient A que dans les autres
- c) plus grande dans le récipient B que dans les autres
- d) plus grande dans le récipient C que dans les autres



Les fonds des récipients sont égaux

Le questionnaire dit « des poissons » (encadré 3.2) confirme cette seconde difficulté, en confrontant les élèves au cas de deux poissons situés à la même profondeur, l'un en pleine mer et l'autre dans une grotte sous-marine.

Là, les résultats après enseignement à l'université marquent un net progrès par rapport aux élèves du secondaire puisque seulement un tiers des étudiants ne donne pas la réponse correcte²⁰ contre presque trois quarts au niveau du lycée²¹. Mais on n'observe jamais, en appui à une réponse correcte, l'argument qui réconcilie cette règle et la formule $\Delta p = -\rho g \Delta h$, à savoir l'interaction qui existe entre le plafond de la grotte et l'eau, là où celle-ci est déjà comprimée par rapport à sa surface libre.

20 25 % considèrent que la pression est plus grande en pleine mer et 8 % répondent l'inverse. Noter l'argument principal à l'appui de cette dernière réponse, à savoir que dans un espace confiné la pression, vue comme un tassement ou bien comme due à l'entrave des parois, est plus grande. Cet argument est beaucoup plus présent au niveau du lycée que chez les étudiants interrogés.

21 Soit respectivement : (33 %, N = 214 à l'université) et (72 %, N = 133 au lycée).

ENCADRÉ 3.2

Le questionnaire des poissons

Les questions suivantes concernent la situation de la figure.



Question 1

La pression de l'eau est

- a) égale pour les deux poissons
- b) plus grande pour le poisson dans la grotte
- c) plus grande pour le poisson en pleine mer

Question 2

L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en bas de la grotte ?

Le rocher exerce-t-il une force sur l'eau en bas de la grotte ?

Question 3

L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en haut de la grotte ?

Le rocher exerce-t-il une force sur l'eau en haut de la grotte ?

Justifiez bien vos réponses, s'il vous plaît.

L'argumentation spontanément fournie en appui aux réponses correctes repose sur l'identité des profondeurs des poissons, avec ou sans la formule classique. Et lorsque l'on demande ce qu'il en est de l'interaction entre rocher et eau, l'existence de celle-ci n'est pas universellement reconnue²². Il est donc bien possible que le défaut d'argumentation que l'on observe traduise une application superficielle d'une règle chez ceux qui répondent correctement et un élément de blocage chez les autres. Certains l'expriment très clairement : « il est vrai qu'ils sont à la même profondeur (*les poissons*), dès lors ils devraient supporter la même pression. Cependant, l'eau qui se trouve au dessus du poisson dans la mer est une masse plus importante que la masse d'eau qui se trouve au dessus du poisson dans la grotte. Dans la mer, le poisson supporte donc une plus grosse pression que l'autre poisson. »

²² Seulement 113/168 étudiants consultés disent que cette interaction existe, 32 en nient l'existence et 23 s'abstiennent.

Deux autres questionnaires utilisés auprès des mêmes populations complètent l'information sur leur éventuel raisonnement systématique.

D'une part, via l'évocation d'une seringue remplie d'eau et dont on pousse le piston, on apprend qu'un tiers des étudiants consultés (37 %, N = 214) envisagent une réduction du volume de l'eau, réduction dite « très petite » ou sans autre spécification : cela encourage à s'appuyer sur cette idée utile dans l'enseignement.

D'autre part, à propos d'un ballon maintenu immergé dans l'eau (encadré 3.3), une petite moitié²³ seulement des étudiants range correctement par ordre d'intensité les forces exercées par l'eau sur quatre disques identiques dessinés sur ce ballon, situés respectivement sur le haut (A), les côtés (C et D) et le bas (B) de celui-ci. De plus, en réponse à une question explicite sur ce point, il est manifeste que pour un très grand nombre d'étudiants – plus de la moitié²⁴ l'exprime clairement – l'interaction d'Archimède n'est pas la résultante des forces associées à la pression hydrostatique.

Chez ceux-ci, une réponse très répandue²⁵ est tout simplement que la « poussée d'Archimède » n'a rien à voir avec les multiples interactions locales entre le liquide et les éléments de surface du corps immergé :

- « Non, la poussée d'Archimède pousse seulement du bas vers le haut, elle n'a rien à voir avec la pression qu'exerce un liquide autour d'un objet. »
- « Non, rien à voir, car sont des forces de pression, ce qui est fondamentalement différent. »
- « ... en bas il y a en fait deux forces qui s'additionnent : les forces de pression et la poussée d'Archimède. »

Il arrive également souvent²⁶ que la poussée d'Archimède s'identifie à la seule force exercée en bas du ballon :

- « La force verticale en B est la poussée d'Archimède. »
- « La force verticale en B est la poussée d'Archimède, tandis que les forces agissant sur C et D sont dues à la pression dans le liquide. »

ENCADRÉ 3.3

Le questionnaire : « ballon dans l'eau »

Un ballon de football est tenu complètement immergé dans l'eau, par une ficelle fixée au fond. Il faut le tenir par la ficelle, sinon il remonte à la surface.

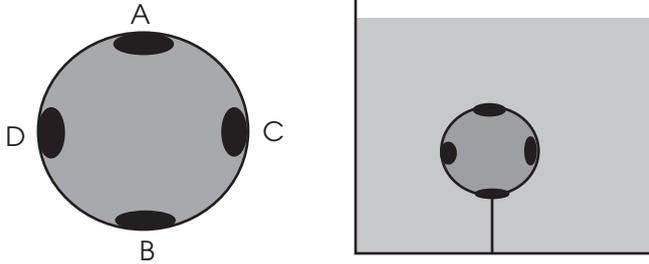
Quatre disques noirs identiques y sont dessinés, situés respectivement au-dessus (A), au-dessous (B), sur les cotés (C, D) du ballon (cf. la figure).

²³ 42 %, N = 215.

²⁴ 55 %, N = 168

²⁵ 28 % du total.

²⁶ 27 % du total.



Question 1

L'eau exerce-t-elle une force (si oui précisez-en la direction, par une flèche sur la figure)

- | | | |
|-------------------|-----|-----|
| sur le disque A ? | oui | non |
| sur le disque B ? | oui | non |
| sur le disque C ? | oui | non |
| sur le disque D ? | oui | non |

Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas, dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

Question 2

Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

Justifiez bien vos réponses, s'il vous plaît.

Enfin, de manière symptomatique, plusieurs étudiants semblent être troublés à cause de la formule bien connue liant la poussée d'Archimède au volume du liquide déplacé et à la densité, ce qui leur paraît incompatible avec les forces de pression, qui, au contraire, dépendent de la surface :

- « Non, parce que la poussée d'Archimède est directement proportionnelle au volume de l'objet en question et à la densité du liquide, tandis que la pression n'est pas influencée par le volume de l'objet. »
- « Non, car la force d'Archimède dépend du volume d'eau déplacée, tandis que les forces exercées par l'eau sur un corps ne dépendent pas de ce corps, elles sont toujours identiques. »

On ne saurait plus clairement exprimer l'obscurité du « tout macroscopique », dont le lien avec l'analyse locale est bien masqué ici par un théorème d'intégration.

Voilà donc brossé, à grands traits, le tableau de l'état de compréhension de la statique des fluides²⁷ qui est encore répandu chez des personnes en principe instruites en mécanique élémentaire voire en hydrostatique. Il confirme, à notre sens, ce qui ressort de l'analyse *a priori* des difficultés de l'approche macroscopique des phénomènes de statique des fluides, lesquelles sont liées, en bref, à la nécessité d'une analyse systématique, où chaque partie du fluide informe l'ensemble et s'y adapte.

Comment favoriser une meilleure compréhension des phénomènes relevant de la statique des fluides à l'aide d'une modélisation de leur structure, en minimisant les risques de complication inefficace ou pire, de renforcement d'idées qu'on cherchera ensuite à déloger ? Sur ce point, les études disponibles ne sont pas légion²⁸. Il faudrait donc bien avancer sur ce terrain.

4

UNE PROPOSITION POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA STATIQUE DES FLUIDES

Principes de construction

Ne sont décrits ici que les éléments de proposition d'enseignement qui ont pu être évalués lors d'une courte expérimentation auprès d'étudiants de première année universitaire. Il ne s'agit pas d'un programme complet d'enseignement du domaine, mais d'un complément mis en œuvre après un cours magistral classique sur la statique des fluides. Les étudiants concernés étaient à la fois introduits, via ce cours, d'une part au modèle microscopique des fluides, interactions entre particules comprises, d'autre part à la relation $\Delta p = -\rho g \Delta h$ ainsi qu'au théorème d'Archimède.

27 L'étude de Besson (références en note 18) comporte aussi des éléments de comparaison entre les réponses d'étudiants à propos des liquides et des gaz, via la transposition des situations décrites ici : poissons, seringue, ballon dans l'eau.

28 La gravité est absente des propositions de modélisation dont nous avons trouvé trace dans la littérature didactique à la date d'écriture de ce livre. Borghi *et al.* (1996) proposent un modèle en termes de palets circulaires ou de billes en acier interagissant par contact, avec frottement nul, qui va, du fait de son horizontalité implicite, avec l'affirmation que la pression est la même dans tout le liquide.

Les analyses présentées en début de ce chapitre nous conduisent à choisir un niveau *mésoscopique* de description des fluides en présence de gravité, ce qui permet d'envisager un *contact* entre les éléments de base de la modélisation. Les correspondants analogiques des éléments de fluide sont des balles de mousse, considérées comme étant compressibles, quoique très peu. Aussi bien les balles de mousse que leurs correspondants fluides sont présentés comme ayant des interactions de contact avec les éléments voisins. Les balles de mousse ne sont pas en correspondance avec les molécules, mais plutôt avec les *particules*, les *gouttelettes* de liquide.

Ceci rejoint la modélisation utilisée classiquement en hydrodynamique et en hydrostatique²⁹ : l'élément est assez petit pour permettre une description locale et en même temps il comprend un très grand nombre de molécules, assez pour y définir des grandeurs moyennes (pression, température, densité, etc.) et mettre en œuvre une équation d'état, la cinétique moléculaire demeurant cachée et représentée, dans ses effets, par les grandeurs macroscopiques.

L'idée est de rendre accessible à l'intuition des étudiants cette décomposition mésoscopique, en évoquant des objets avec lesquels établir une analogie de comportement, en ce qui concerne le champ bien limité de la statique des fluides en présence de la gravité. Les petites « quantités élémentaires », typiques du discours du calcul infinitésimal, deviennent, dans le modèle, des objets, qui peuvent interagir, pousser et être comprimés.

Par là, les difficultés dont témoignent les enquêtes brièvement rapportées plus haut devraient, c'est du moins notre hypothèse, être atténuées. Il s'agit en effet de fournir aux étudiants le moyen d'analyser les mécanismes d'établissement de l'équilibre, autrement dit ceux qui régissent, en quelque sorte, la transmission de l'information physique d'un bout à l'autre d'un système lorsque celui-ci est perturbé³⁰.

La conciliation d'un point de vue local et d'un point de vue global est à la clé de cette entreprise. Un élément important dans cette articulation entre descriptions locale et globale est de cesser de dire qu'un liquide est incompressible, au sens où il le serait absolument : comment un élément de fluide pourrait-il transmettre au voisin l'effet d'une perturbation si lui-même n'est en rien modifié ? Les variations de volume des liquides sont en général très petites, souvent négligeables dans les calculs, mais elles sont essentielles pour comprendre ce qu'il se passe³¹.

29 Voir par exemple Guyon *et al.* (1991).

30 Les propositions de plusieurs chercheurs en matière d'enseignement de l'électricité (Eylon & Ganiel 1990, Härtel 1993, Sherwood & Chabay 1993, Psillos 1995, Rainson 1995) rejoignent ce point de vue, selon lequel il est difficile de comprendre un état ou un régime établi sans savoir comment il a été généré, et comment il s'adapte aux perturbations.

31 Besson 1997 et 2001.

Noter aussi que ce modèle rejoint tout à fait l'association entre pression et tassement dont la faveur, chez ceux qui apprennent, est attestée par les études évoquées plus haut. Cela présente l'avantage d'ancrer le parcours conceptuel sur une idée commune³² tout en situant celle-ci explicitement hors du champ de la description microscopique admise. Il y a un risque important, dans le cas contraire, de laisser déteindre sur le modèle microscopique introduit cet aspect de l'analyse commune : la pression réduite à l'idée de tassement.

Ce modèle doit vraiment être compris comme une aide très provisoire à la compréhension, clairement distinct de celui dont la valeur unificatrice supérieure n'est plus à démontrer, à savoir le modèle microscopique.

Ses limites sont patentes. On verra que l'idée de désordre, si essentielle à celle de liquide, est provisoirement occultée. De plus, l'image des billes de mousse favorise l'idée de transmission de modifications de pression, mais elle présente des inconvénients certains. Le matériau suggère un frottement entre boules, et même si ce facteur n'est absolument pas mis en cause dans l'analyse proposée et si l'on peut bien affirmer l'absence d'interactions à composantes tangentielles entre boules, il y a de quoi être un peu chagriné : des billes d'acier seraient plus séduisantes de ce point de vue, mais éloigneraient l'idée de transformation locale. En outre, avec ou sans frottement, un sac de billes ou un tas de sable différent sensiblement d'un liquide, même dans leur comportement statique, mettant en échec la relation $\Delta p = -\rho g \Delta h$, et le foisonnement d'études des deux dernières décennies rend le sujet sensible³³ : va-t-on grever durablement la compréhension des milieux granulaires en associant inconsidérément la relation incontournable de l'hydrostatique et une vision d'empilement d'objets ronds et en tout cas discrets ? Dans cette discussion, il est intéressant de remarquer que dans les études sur les matériaux granulaires on utilise souvent des analogies avec les fluides, et des modélisations en termes de « milieux continus »³⁴. Là comme pour les fluides, il s'agit de trouver un niveau intermédiaire, pour cacher les irrégularités de l'échelle la plus petite et éviter de suivre la mécanique de chaque grain ou de chaque molécule, ce qui serait d'ailleurs aussi impossible qu'inintéressant³⁵.

32 Sur cette idée qui consiste à s'appuyer sur certains aspects du raisonnement commun, voir notamment Clement *et al.* 1989, Besson 1997 et 2001, Besson *et al.* 2001a, Viennot 1997.

33 Des effets d'anisotropie, des hétérogénéités, des comportements non linéaires apparaissent, avec des phénomènes spécifiques tels la dilatance, la formation de voûtes, le « trou de pression » sous la pointe d'un tas de sable, ... (voir Duran 1999, Cantelaube 1997).

34 Voir par exemple Duran 1999, Cates *et al.* 1999, Jaeger *et al.* 1996 (qui mentionnent, à propos de leurs objectifs : « granular hydrodynamics, ... continuum theories consisting of partial differential equations, analogous to the Navier-Stokes equations for Newtonian fluids »).

35 Dans les fluides les moyennes sont faites sur un nombre beaucoup plus élevé de particules (atomes, molécules) que dans les milieux granulaires, la différence d'échelle (des longueurs et des temps) entre les niveaux étant bien plus grande dans le cas des fluides (Jaeger *et al.* p. 34).

Des recherches récentes³⁶ et actuellement en cours mettent d'ailleurs l'accent sur la compressibilité des éléments du milieu étudié, plus précisément sur son élasticité anisotrope, un point de vue qui s'étend à l'analyse des gels, lesquels ne sont guère plus respectueux de la relation qui régit l'hydrostatique que ne le sont les milieux granulaires. En fin de compte, les propriétés de ces milieux surprenants sont bien intéressantes, mais s'il s'agit d'enseigner l'hydrostatique, le caractère discret et ordonné des éléments de base d'un modèle mésoscopique n'est probablement pas plus dommageable pour la compréhension ultérieure des entassements granulaires que ne le serait celle d'incompressibilité. Et sur ce terrain-là, le modèle des balles de mousse constitue *a priori* une approche favorable.

Par définition, le modèle intermédiaire que nous proposons est incomplet, il permet certains éclairages, contraint à quelques sacrifices et devra être dépassé lorsque tel sera le cas de l'hydrostatique. Si les sacrifices sont provisoires et laissent agir d'autres facteurs, cela peut en valoir la peine. Et d'ailleurs il faut bien admettre que la fluidité et le désordre ne sont pas particulièrement évoqués par les cylindres, plutôt semblables à des boîtes de conserve empilées, qui accompagnent sur nos tableaux noirs les calculs d'hydrostatique, notamment atmosphérique.

La mécanique des balles de mousse

Rentrons maintenant dans le détail. Dans la séquence qui a été expérimentée, après un test d'entrée comportant le questionnaire « Récipients » décrit en annexe, le modèle est présenté comme suit.

Les balles de mousse ont une masse et un poids, elles peuvent être déformées et comprimées, et réagissent aux déformations par des forces élastiques, de la même façon dans toutes les directions. Elles sont assez raides, autrement dit, pour les forces prises en considération, leurs déformations sont bien réelles, mais très petites. Les valeurs des variations relatives du volume, du diamètre et de la masse volumique, $\Delta V/V$, $\Delta d/d$ et $\Delta \rho/\rho$, sont faibles, mais on en tient compte dans les raisonnements.

Si un expérimentateur pousse sur une balle de deux côtés opposés, celle-ci s'écrase un peu, se déforme et tend à s'élargir dans les autres directions. Si la balle est bloquée dans ces directions par une paroi ou par une autre balle, alors elle pousse contre l'objet qui la bloque.

36 Voir Savage 1998, dont la modélisation se distingue ainsi de celle de Cates *et al.* 1999.

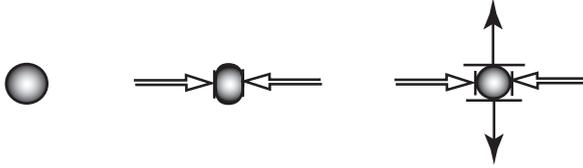


FIGURE 3.1

Éléments de base du modèle : des balles de mousse dont l'éventuelle (faible) déformation se répercute sur les voisines.

Au début de la séquence, l'enseignant(e) propose trois situations, qu'on décrit à l'aide des graphiques représentant les forces d'interaction entre balles voisines en fonction de la position du point de contact de chaque couple de balles.

a) Situation horizontale

Une série de balles est placée horizontalement sur une table. D'un côté il y a une paroi, de l'autre un expérimentateur³⁷ pousse sur la première balle. À l'équilibre, les forces entre balles voisines sont toutes de même intensité.

L'enseignant(e) amène les étudiants à faire un schéma des forces et insiste sur le fait que les forces dirigées vers la droite ont la même intensité que celles qui sont dirigées vers la gauche.

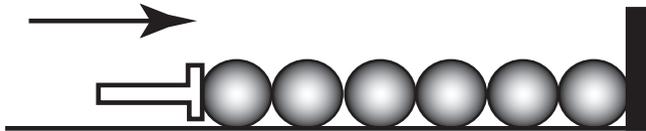


FIGURE 3.2

Série horizontale de balles de mousse calées par un obstacle. La flèche représente une force exercée par un expérimentateur extérieur.

La suite consiste à faire construire un graphique de l'intensité des forces $F(n)$, l'indice $n (= 0, 1, 2, 3, \dots)$ désignant les points de contact successifs entre deux balles voisines (fig.3.3) : les points du graphique sont tous sur une droite parallèle à l'axe horizontal (n).

³⁷ Il s'agit seulement d'une évocation.

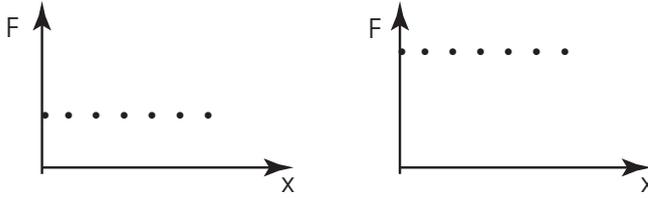


FIGURE 3.3

Situation horizontale : intensité des forces impliquées dans chaque interaction de contact, en fonction du numéro d'ordre de chacun de ces points dans la file de balles, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

Pour qu'il y ait l'équilibre, il faut que les forces réciproques aient la même intensité le long de toute la file horizontale des balles de mousse.

Il s'agit aussi de comprendre ceci : si l'expérimentateur pousse plus fort, les forces augmentent d'intensité, mais *toutes de la même façon*, donc les intensités sont encore toutes égales entre elles. Le graphique est encore une droite horizontale, mais *déplacée vers le haut*. En faisant varier la force exercée par l'expérimentateur, on fait varier toutes les intensités des interactions à la fois, tout en gardant l'égalité des intensités des forces réciproques impliquées dans un contact donné.

La suite consiste à faire construire un graphique $F(x)$, x étant l'abscisse de la position des points de contact entre les balles voisines. On obtient les mêmes résultats qu'auparavant, les points du graphique sont encore sur une droite horizontale, qui se déplace parallèlement vers le haut si l'on pousse plus fort. Mais les points se rapprochent un peu quand on accentue la poussée, car les balles se compriment légèrement, donc la distance entre les points de contact diminue.

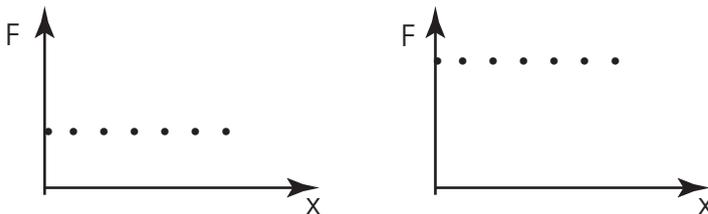


FIGURE 3.4

Situation horizontale : intensité des forces impliquées dans chaque interaction de contact, en fonction de l'abscisse de chacun de ces points dans la file de balles, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

b) Situation verticale, poussée extérieure vers le bas

L'enseignant(e) propose ensuite la seconde situation.

Les balles sont placées l'une sur l'autre, la plus basse est appuyée sur le sol, la plus haute est poussée par la main vers le bas.

L'enseignant(e) amène les étudiants à faire un schéma de forces et insiste sur le fait que pour chaque couple de balles en contact, la force d'interaction dirigée vers le haut a même intensité que sa réciproque dirigée vers le bas.

Dans ce cas, les forces entre les balles voisines ne sont pas toutes de même intensité : plus on va vers le bas, plus l'intensité de celles-ci augmentent, à chaque fois d'une quantité égale au poids d'une balle.

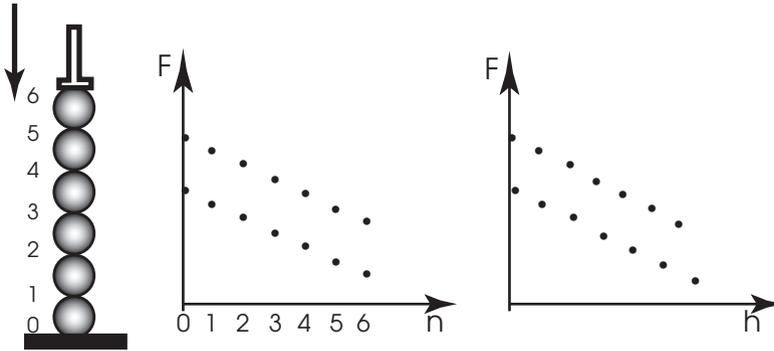


FIGURE 3.5

Pile de balles subissant une poussée extérieure vers le bas, et allure des graphiques représentant l'intensité des forces impliquées dans chaque interaction de contact,

- a) en fonction du numéro d'ordre (n) de chacun de ces points dans la file de balles (de bas en haut) ;
- b) en fonction de l'altitude (h) de ces points, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

L'enseignant(e) amène les étudiants à faire un graphique de l'intensité des forces $F(n)$, l'indice $n (= 0, 1, 2, 3, \dots)$ désignant les points de contact successifs entre deux balles voisines, à partir du bas (fig. 3.5) : les points du graphique se disposent tous sur une droite inclinée, décroissante avec n .

Si l'expérimentateur accentue la poussée, les balles subissent des petites déformations et les forces augmentent d'intensité, mais *toutes de la même façon*, donc les différences ΔF entre intensités de force correspondant à des points de contact successifs demeurent inchangées et toujours égales au poids de chaque balle. En augmentant la force exercée par l'expérimentateur, on fait varier toutes les intensités des interactions à la fois, tout en gardant inchangées leurs différences. Le graphique est encore une droite inclinée, mais *déplacée parallèlement vers le haut*.

La suite consiste à faire établir un graphique $F(h)$, h étant l'altitude par rapport au sol des points de contact entre les balles voisines. Les points de ce graphique ne sont pas exactement sur une droite. En effet, la différence ΔF , égale au poids d'une balle, est toujours la même, tandis que la distance Δh entre deux points de contact successifs diminue légèrement en allant du haut vers le bas, à cause des déformations, qui sont plus grandes en bas qu'en haut. Donc, le rapport $\alpha = \Delta F / \Delta h$ n'est pas exactement constant, il augmente vers le bas. Ces différences sont toutefois très petites, car le poids des balles est lui-même très petit face aux forces nécessaires pour provoquer des déformations importantes. On peut donc dire, dans ce modèle, que les points du graphique $F(h)$ sont encore, avec une très bonne approximation, sur une droite inclinée, décroissante avec h .

Si l'expérimentateur pousse plus fort, cette droite se déplace vers le haut, mais, à cause des déformations des balles, deux points successifs de la nouvelle droite sont alors séparés par une distance Δh un peu plus petite qu'auparavant, tandis que les valeurs de ΔF ne changent pas et sont encore égales au poids de chaque balle. Par conséquent, la droite devient un peu plus inclinée, $\Delta F / \Delta h$ augmente, mais très peu. On peut donc dire que la droite se déplace vers le haut, tout en étant *presque parallèle* à la précédente.

En conclusion, le graphique $F(h)$ envisagé est *presque* une droite, inclinée, qui se déplace *presque* parallèlement vers le haut, si l'on pousse plus fort.

Ces « presque » indiquent des variations relatives de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} ou moins.

c) Situation verticale, poussée extérieure vers le haut

L'enseignant(e) aborde ensuite la troisième situation.

Les balles sont encore placées verticalement l'une sur l'autre, mais la plus basse est appuyée sur la main, la plus haute étant contre le plafond.

Tout comme dans la situation *b*, les forces entre balles voisines ne sont pas de même intensité, leur intensité diminue, d'un point de contact au suivant situé juste au dessus, d'une quantité égale au poids de chaque balle. Les graphiques sont identiques aux précédents.

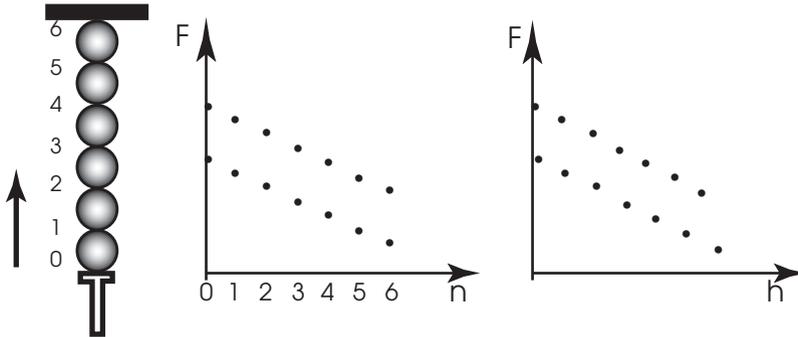


FIGURE 3.6

Pile de balles subissant une poussée extérieure vers le haut, et allure des graphiques représentant l'intensité des forces impliquées dans chaque interaction de contact,

- a) en fonction du numéro d'ordre des chacun de ces points dans la file de balles (de bas en haut) ;
- b) en fonction de l'altitude de ces points, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

L'enseignant(e) suscite l'analyse suivante.

Si l'on pousse plus fort vers le haut, les forces augmentent toutes de la même quantité et le graphique $F(n)$ se déplace vers le haut. Si l'on augmente la force exercée par l'expérimentateur, le diagramme monte en bloc, les différences entre intensités d'interactions à des points de contact successifs demeurant égales au poids de chaque balle.

Pour le graphique $F(h)$ on peut faire les mêmes considérations que pour la situation b. Le graphique $F(h)$ est presque une droite, inclinée. Si l'expérimentateur accentue la poussée, il y aura une petite diminution des valeurs Δh de la distance entre deux points de contact successifs, ce qui fait que le graphique de la fonction $F(h)$ ne se déplace pas de façon exactement parallèle, mais presque.

L'enseignant(e) souligne bien l'identité de l'analyse des deux situations b, c, et le fait que la balle la plus haute pousse sur le plafond, qui exerce sur celle-ci la force réciproque.

Analogie entre liquide et balles de mousse

L'enseignant(e) propose explicitement une analogie entre le diagramme $F(h)$ pour les balles de mousse et celui associé à la pression $p(h)$ pour les fluides.

Le débat revient sur les situations horizontale et verticale, et conduit à faire deux graphiques $p(x)$ et $p(h)$.

À propos des valeurs négligeables des déformations dues aux forces prises en considération, l'enseignant(e) explique que dans les conditions usuelles les approximations faites pour les balles de mousse sont valables pour les liquides, mais pas pour les gaz³⁸.

Le débat se porte ensuite sur la pression dans un récipient fermé, complètement rempli d'eau, avec un piston qui permet de pousser *en direction horizontale* sur l'eau (fig. 3.7).

L'enseignant(e) amène les étudiants à débattre des questions suivantes, assorties ici des éléments de réponses attendus :

- Quels sont *tous* les points où la pression est égale à la pression p_m présente près du piston ? Et quels sont *tous* les points où la pression est égale à celle, p_1 , d'un point au fond du récipient ? Même question pour la pression p_2 d'un point au plafond du récipient, dans la partie la plus basse et pour celle, p_3 , d'un point au plafond du récipient, dans la partie la plus haute. L'analogie avec les balles en file horizontale est mise en œuvre.

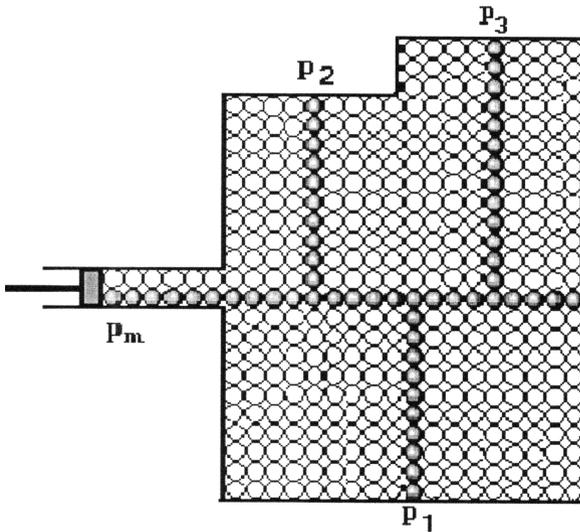


FIGURE 3.7

Un fluide situé dans un récipient clos et sous l'action d'un piston : modélisation à l'aide d'éléments mésoscopiques, analogues des balles de mousse étudiées auparavant.

38 Le coefficient de compressibilité de l'eau étant $\chi = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, on peut calculer que pour avoir une variation de volume ou de densité de 1 %, il faut une pression de 200 atm, soit une profondeur d'environ 2 km. Pour une profondeur de 20 m, on obtient une variation de volume de 10^{-4} , soit 0,01 %. Lorsqu'on augmente la pression p_m au niveau du piston, la variation relative de la pente $\alpha = \Delta p / \Delta h$ du graphique $p(h)$ est : $\Delta \alpha / \alpha = \chi \cdot \Delta p$. Ceci correspond à une variation $\Delta \alpha / \alpha = 1 \%$ avec une valeur $\Delta p = 200 \text{ atm}$.

- Si l'on change la valeur de la pression au niveau du piston, que se passe-t-il ? Comme dans le cas *a* des balles de mousse, le diagramme de la pression $p(x)$ pour les points situés sur une même ligne horizontale monte ou descend en bloc, tout en gardant son horizontalité (fig. 3.8). Ceci signifie que les pressions changent toutes de valeur, tout en demeurant égales entre elles.
- La variation de la pression au niveau du piston a-t-elle des répercussions en direction verticale ? Oui, parce que, lorsque p_m augmente, les boules sur la même ligne horizontale poussent plus fort sur leurs voisines, y compris dans la direction verticale, vers le haut et vers le bas. Il y a ici une faiblesse du modèle, qui peut bien faire comprendre l'existence d'une transmission de la poussée dans toutes les directions, mais guère davantage. L'enseignant(e) pose, comme élément de la théorie admise, l'isotropie des forces associées à la pression en un point, en précisant que le modèle n'en rend pas compte.

L'enseignant(e) développe l'analogie sur la base de graphes. Il s'agit de développer l'argumentation suivante.

Tout comme dans les cas de la main qui poussait les balles de mousse, pousser vers le haut, vers le bas ou en direction horizontale une colonne de liquide, dont l'autre extrémité est bloquée, revient à faire varier en bloc les intensités de toutes les interactions, en maintenant les différences (fig. 3.8).

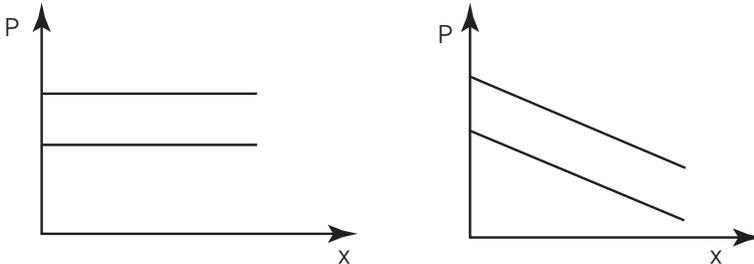


FIGURE 3.8

Allure des graphiques représentant la valeur de la pression le long de séries d'éléments de fluide

- a) en fonction de l'abscisse de chacun des points considérés dans une file horizontale,
- b) en fonction de l'altitude des points considérés dans une file verticale, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

Le débat exploite encore une fois le graphe de la fonction $F(h)$ comparé à celui de la fonction $p(h)$, en référence explicite aux colonnes de liquide dans le récipient en étude et qui sont en cause pour l'étude des pressions aux points considérés auparavant (P_1, P_2, P_3, P_m).

Pour amener une réflexion sur les interactions de l'eau avec les parois de l'objet ou d'une enclave introduite dans l'eau, l'enseignant(e) porte l'analyse sur une modification du récipient représenté en figure 3.7 (voir aussi fig. 3.9).

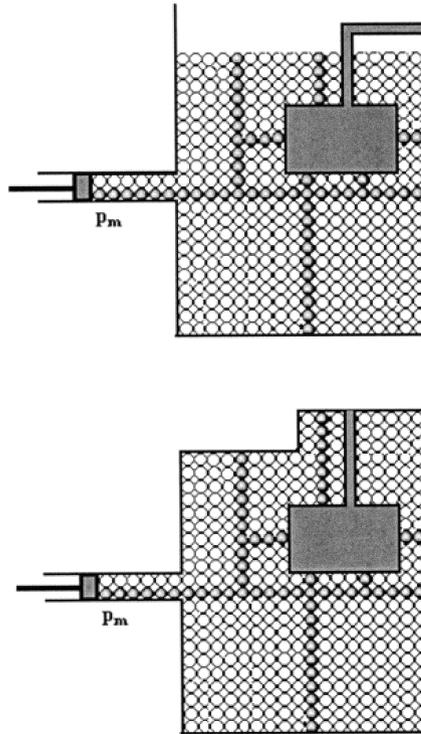


FIGURE 3.9

Deux variantes de la situation évoquée en figure 3.8, modélisées de la même façon.

Débats finaux en petits groupes

Dans la phase finale, l'enseignant(e) propose aux étudiants de revenir sur la première question du questionnaire d'entrée « Récipients » (encadré 3.1), en leur demandant s'ils envisagent maintenant de changer leurs réponses, et dans l'affirmative, pour quel motif. Les étudiants travaillent en groupes de deux ou trois. On leur propose aussi de réfléchir sur la comparaison des pressions en deux points A, B de récipients tels que ceux qui sont représentés en figure 3.10, ou en figures 3.7 et 3.9.

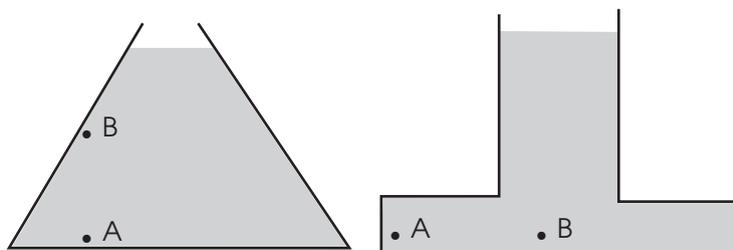


FIGURE 10

Comment concilier les règles concernant la pression dans le fluide et l'analyse des interactions locales avec les parois : deux situations d'étude.

5

ÉLÉMENTS D'ANALYSE DE LA SÉQUENCE : LIGNES D'ATTENTION

Il s'agit d'une *séquence très courte*, qui permet donc d'examiner s'il est possible, avec des modifications de l'enseignement nullement spectaculaires, de produire des changements très ciblés sur quelques aspects précis de compréhension d'un domaine, ici la statique des fluides.

Il n'est pas besoin de revenir sur le fait que le contenu à enseigner dans cette séquence a fait l'objet d'un choix d'*éclairage* tout à fait spécifique. La vision mésoscopique y occupe une place centrale, et donc aussi une analyse de type mécaniste³⁹, dont l'efficacité s'est imposée en hydrodynamique contemporaine. Tel qu'il est introduit, ce modèle de balles de mousse n'a évidemment pas toutes les vertus, notamment parce qu'il

39 À la fin du XVIII^e siècle, Lagrange et Poisson incarnaient deux positions qui allaient s'affronter pendant longtemps encore, respectivement mécaniste, mettant en œuvre des éléments de fluides en contact, et moléculaire, avec des particules en mouvement séparées par du vide. Locqueneux (2001, p. 124) cite à ce propos Duhem (1903, réédition 1992, pp. 72-73) qui commente : « Entre les divers éléments de volume d'un milieu continu, traité selon la méthode de Lagrange, on peut fort bien admettre l'existence de ces forces attractives ou répulsives introduites par la Physique newtonienne et nommées actions moléculaires (...). Mais l'existence de ces actions mutuelles n'empêche nullement chaque partie d'un tel milieu continu d'être impénétrable aux parties voisines, en sorte que la présence de chacune de ces parties oppose un obstacle au mouvement des parties contiguës et constitue pour elle une liaison » ; et plus loin, (p. 84), parlant de l'analyse de Poisson : « Pour mener ses calculs jusqu'au bout, il lui faut renoncer, tôt ou tard, à traiter les corps comme des assemblages de points matériels libres et restituer à la matière la continuité qu'elle lui avait refusée ».

ne constitue qu'une toute première approche de l'isotropie des forces associées à la pression dans un fluide. En revanche, avec toutes ses limites, il permet néanmoins un premier accès à l'analyse des phénomènes atmosphériques, puisqu'il suffira de remplacer, typiquement, une goutte d'eau par un litre d'air pour commencer à comprendre une atmosphère isotherme. Cette remarque amène tout de suite la question du prolongement de cette séquence. Il faudra comprendre ce qui rend compte de la répulsion des éléments de fluide en contact, et donc « rentrer » en quelque sorte, dans la goutte ou dans le litre d'air de base, autrement dit, pour reprendre l'intitulé du programme de Seconde en cours en France, passer de l'« air qui nous entoure » à ce que ce programme aborde en fait : l'air, ou l'eau, dans une seringue. Ce modèle avec vide entre les particules et considération de la cinétique, qui a déjà fait l'objet de nombreuses études didactiques, est bien sûr incontournable et il faudra bien en rendre l'apprentissage plus efficace. Contentons-nous, ici et pour l'instant, de ceci : des études sont en cours.

L'*image* joue bien sûr un rôle central dans cette séquence. Mais nous n'avons pas décelé d'aspects véritablement critiques dans les détails graphiques mis en œuvre, sinon bien sûr celui-ci : les balles de mousse sont représentées en contact. On pourrait penser qu'il y a une certaine contradiction entre deux niveaux de modélisation, l'un étant plus proche que l'autre d'une réalité imaginable. En effet, dans le modèle proposé, les balles sont en contact, mais pour l'analyse préliminaire des interactions les concernant, l'usage éventuel des schémas éclatés (chapitre 2) peut amener provisoirement à les représenter avec un certain espacement. Dans l'expérience décrite ici, la brièveté de la séquence n'a pas permis que l'analyse proprement mécanique des séries de boules en contact se développe à loisir, ni se prépare par un travail sur des situations voisines. Si des schémas éclatés ont été mis en œuvre, ce ne peut être que brièvement. On peut donc penser que les élèves ont eu à travailler au voisinage de leur acquis préalable en mécanique. La situation d'objets en contact, empilés, est d'ailleurs si familière qu'il serait surprenant que les élèves soient en difficulté pour l'imaginer.

Quant aux graphiques représentatifs de fonction, ils sont censés appuyer fortement la progression conceptuelle visée, notamment par la visualisation des changements « en bloc » des valeurs des pressions associées à une action extérieure.

L'*expérience* est absente de la séquence expérimentée : les situations sont seulement évoquées. Pour la mise à profit des éléments introduits par l'enseignant, c'est donc sur une construction conceptuelle progressive, appuyée par débats et analyses de graphiques, que l'on compte surtout. Bien sûr, on peut souhaiter que ce défaut d'expérience soit pallié avant ou pendant la séquence. Mais si notre analyse *a priori* a quelque pertinence, les difficultés observées ne peuvent être résolues par le seul constat des valeurs de la pression ici ou là. En effet, on observe des blocages chez des élèves qui connaissent fort bien la relation classique

$\Delta p = -\rho g \Delta h$, mais n'arrivent pas à intégrer celle-ci dans une analyse d'ensemble de la situation.

C'est précisément sur ce point que se centre notre évaluation.

6

ÉVALUATION DE LA SÉQUENCE AUPRÈS D'ÉTUDIANTS

Dispositif expérimental

La séquence d'enseignement a été expérimentée deux ans de suite (1999 et 2000) en première année universitaire scientifique à Louvain la Neuve, après un cours magistral classique sur ce thème. Le cours théorique de statique des fluides (4 heures) a été laissé inchangé, et chaque année les groupes expérimentaux⁴⁰ ont suivi la séquence pendant que les groupes de contrôle⁴¹ étaient occupés dans des séances classiques d'exercices d'hydrostatique. Lors d'une séance de travaux dirigés de deux heures, chaque enseignant a présenté à son groupe d'étudiants le modèle et son utilisation, avec des exemples et des questions soumises au débat, comme cela est décrit ci-dessus. Ceci s'est prolongé, la seconde année, par une demi-heure de débats, une semaine après, les étudiants travaillant en groupes de deux ou trois, sur une seule question concernant les trois récipients remplis d'eau (encadré 3.1).

Au moins pour certains aspects, les bénéfices observés se sont accentués après l'introduction de ce développement. Sauf indication contraire, les données reportées ici ne portent que sur cette deuxième année⁴².

L'évaluation a été faite moyennant un questionnaire d'entrée, plusieurs questionnaires de sortie et les enregistrements sonores des débats des étudiants lors de la deuxième séance.

40 Groupes expérimentaux : 5 groupes en 1999 et 11 groupes en 2000, pour un total de 71 et 169 étudiants respectivement.

41 Groupes témoins : 5 groupes en 1999 et 7 en 2000, pour un total respectivement de 77 et 94 étudiants.

42 Toutes les données concernant les deux années sont détaillées dans Besson 2001. Un enseignant expérimentateur était associé aux travaux d'élaboration de la séquence (J. Lega), deux autres ne l'étaient pas. L'absence d'effet en faveur du premier nous conduits à regrouper les résultats.

Avant le début de la séquence, le même questionnaire, « Récipients » (encadré 3.1, et annexe A)⁴³, a été proposé à tous les étudiants. Le but était d'évaluer le niveau de compréhension des étudiants après le cours magistral et de comparer les deux populations, expérimentale et de contrôle, pour en vérifier l'équivalence.

Dans la séance finale de débat entre étudiants, neuf binômes volontaires repartis sur autant de groupes expérimentaux ont été enregistrés, la discussion durant de l'ordre de 15 à 20 minutes. Lors de cette séance, le professeur circulait d'un binôme à l'autre. Des feuilles de réponses (14) avec dessins et commentaires ont aussi été recueillies.

Environ quatre semaines plus tard, nous avons soumis à tous les groupes quatre questionnaires. Les liens des trois premiers (« Poissons », « Ballon dans l'eau », « Seringue ») avec les objectifs de la séquence ne sont plus à développer, à ce stade de l'exposé. Le quatrième (« Casserole », annexe, E) est là pour voir ce qu'il en est d'un éventuel effet négatif de la séquence : ce modèle situé au niveau mésoscopique agirait-il comme un écran à l'utilisation du modèle moléculaire classique, à propos de cas où celle-ci s'impose ?

Évaluation externe : pré-test et post-test

La comparaison quantitative des réponses d'étudiants ayant ou non participé à la séquence décrite ici fournit des résultats indiquant, de façon tantôt modeste tantôt plus marquée, une avancée dans le sens des objectifs de la séquence. Citons les faits principaux.

Tout d'abord, à travers les questions du test d'entrée (« récipients », annexe, A) il apparaît que les groupes comparés sont tout à fait équivalents. Ceci n'a rien pour surprendre *a priori*, puisque les deux échantillons ont été séparés sans autre critère que le hasard des inscriptions en travaux dirigés, à partir d'une même population initiale : première année scientifique indifférenciée à l'université de Louvain la Neuve. Les réponses au test final traduisent, elles, des différences.

L'identité des valeurs de pression à même profondeur pour les emplacements de deux poissons, l'un en pleine mer et l'autre dans une grotte sous-marine, est plus largement affirmée dans le groupe expérimental que dans l'autre, les quelques 10 % d'écart représentant environ le tiers des étudiants pour qui cette question fait encore problème à ce niveau. La différence est du même ordre quand on rentre dans le détail à propos de l'éventuelle action du rocher sur l'eau en haut de la grotte⁴⁴ : 83 % (N = 169)

43 Rappel : il s'agissait de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond, de même surface, de trois récipients, de formes différentes, remplis jusqu'au même niveau.

44 En bas de la grotte, l'existence d'une telle interaction est plus souvent affirmée, mais elle signe moins nettement une compréhension du problème, car l'interaction est souvent assimilée au poids de l'eau.

dans le groupe expérimental contre 72 % (N = 94) dans le groupe témoin se prononcent pour son existence. Cet aspect peut être mis en relation avec une meilleure compréhension du mécanisme d'adaptation mutuelle entre les états des diverses parties du système étudié. La plus grande fréquence, dans le groupe expérimental, des réponses en faveur d'une faible compressibilité des liquides (questionnaire : « seringue », annexe D) va dans le même sens. Plus marquée est la différence entre les pourcentages des réponses au questionnaire « ballon dans l'eau », dans chaque groupe, qui traduisent une maîtrise conceptuelle de la situation, au demeurant partielle. En effet, lorsqu'il s'agit d'analyser les interactions locales entre l'eau et la paroi du ballon, un écart notable sépare les deux populations, en faveur du groupe expérimental : 58 % (N = 169) de réponses complètement correctes contre 33 % (N = 94)⁴⁵. Ce bénéfice s'arrête net au seuil de la dernière étape de compréhension, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de mettre en rapport la poussée d'Archimède et ces interactions locales, elles-mêmes associées à la pression. Face à la question « ces forces de pression ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? », la remarquable équivalence initiale des deux groupes réapparaît, puisque l'écart entre groupe expérimental et groupe témoin ne dépasse 3 % dans aucune des cinq catégories de réponses utilisées pour l'analyse. Seulement 14 % et 13 % des étudiants, respectivement, disent clairement que la poussée d'Archimède est la résultante ou un effet des forces de pression, tandis que 24 % d'entre eux, dans chacun des deux groupes, se bornent à répondre un « Oui » sans justification pertinente. Enfin une moitié de chaque population (49 %, 48 %, resp.) rassemble les étudiants qui déclarent que la poussée d'Archimède n'a rien à voir avec les forces de pression, voire qu'elle s'ajoute à ces forces, ou encore mettent ladite poussée en relation avec la seule force de pression exercée en bas du ballon, toutes réactions déjà bien présentes dans l'enquête initiale sur les raisonnements communs dans ce domaine⁴⁶ résumée plus haut.

Cette mise en relation entre interaction d'Archimède⁴⁷ et forces de pression à l'interface n'a pas été travaillée lors de la mise en œuvre de la séquence, alors qu'elle en est un prolongement aussi approprié et souhaitable que possible. Ceci constitue, du point de vue de l'efficacité pédagogique de la séquence, l'une de ces aberrations que génèrent les contraintes institutionnelles, en l'occurrence l'extrême brièveté du temps alloué pour l'expérimentation. En revanche, du point de vue de l'expérimentation, ceci contribue à séparer certains paramètres et à faire le tri dans leurs effets. Telle qu'elle a été expérimentée, la séquence favorise la

45 Test du χ^2 : $p=0,01$ %, voir détail en annexe, C.

46 Cette enquête avait été bien évidemment menée auprès d'étudiants différents de ceux ayant suivi la séquence.

47 Cette désignation nous paraît beaucoup plus heureuse que celle que véhicule la tradition : « poussée d'Archimède », laquelle semble notamment exclure l'existence d'une réciproque (Viennot 1996, chapitre 3). Le questionnaire d'enquête utilise, lui, la désignation traditionnelle, ce qui conduit à ne pas exclure celle-ci parmi les facteurs susceptibles d'intervenir dans les réponses.

compréhension des interactions locales entre un fluide et un corps immergé, mais elle ne permet pas une réorganisation conceptuelle spontanée et massive au sujet de l'interaction d'Archimède. Sur ce dernier point, il faut une action spécifique, ce qui, après une telle préparation, est sans doute possible à faible coût.

Enfin, nous nous sommes préoccupés de savoir, parlant de coût, si l'une des conséquences de la séquence ne risquait pas d'être le blocage d'un outil de raisonnement en principe disponible à ce niveau universitaire, à savoir le modèle moléculaire classique, comportant vide entre particules et cinétique. À cette fin, une situation a été présentée aux étudiants, la première année, après la séquence, dans le but de voir si les argumentations mentionneraient ou non la cinétique moléculaire. Pour une casserole remplie d'eau, il s'agissait de répondre à ces questions : « les molécules de l'eau choquent-elles les parois de la casserole ; si l'on chauffe l'eau, la pression au fond du récipient change-t-elle, si oui augmente-t-elle, diminue-t-elle ? ». L'important ici est qu'on n'observe pas de différence significative dans les pourcentages d'argumentations faisant appel à la cinétique moléculaire, d'une population à l'autre (annexe, E).

Ce sondage n'indique donc pas d'effet négatif, et permet d'évaluer des bénéfices d'ampleur variable. Nous le disons plus haut, pour une question déjà largement maîtrisée à ce stade, celle de la pression à l'emplacement des deux poissons, il faut rapporter le nombre des étudiants présumés bénéficiaires au nombre habituel des récalcitrants pour être un peu impressionné : la proportion est d'un tiers. Mais aussi, il s'agit d'une question qu'une règle apprise suffit à résoudre – à même profondeur la pression est la même – pour peu que l'on ne pense pas trop. C'est dans l'analyse que les choses se compliquent, lorsqu'il faut concilier ce fait et la considération d'autres aspects du système. L'interaction entre rocher et eau est déjà plus discriminante. Quant à l'étude locale des forces agissant sur un ballon immergé, elle fait carrément apparaître une importante différence entre les deux populations comparées, au bénéfice du groupe expérimental. On peut donc suspecter que c'est au niveau de ces raisonnements plus fins, plus éloignés d'une règle apprise, que les choses se passent lors de cette expérimentation. Les transcriptions des débats finaux devraient nous renseigner plus avant sur cette hypothèse.

Les débats entre étudiants

Seuls quelques groupes d'étudiants (9) ont pu être enregistrés, mais leur débats sont fort instructifs. L'ordre de grandeur du temps qu'il leur faut pour résoudre la question posée – un retour sur la question des trois récipients (encadré 3.1) – est de quinze à vingt minutes⁴⁸. Ce qui domine,

48 Pour le débat n°6, seules les dernières minutes ont été enregistrées.

c'est l'impression d'engagement, attestée par le nombre moyen d'alternances des prises de parole (42), les objections, les revirements, la résistance dans les points de vue exprimés, ainsi (débat 1) :

- (...) Moi, pour moi, c'est le « c », même si t'as...
- Mais c'est pas du tout le même cas, enfin j'sais pas !
- Si, si t'as cette bille là et cette bille là qui ont la même pression,
- Mais elles n'ont pas la même pression !
- Ben si, elles l'ont, mettons qu'elles l'ont.
- Oui, mais elles l'ont pas !

Certaines interventions expriment toute la difficulté de l'entreprise :

- Eh, j'ai des problèmes avec ces trucs, moi (débat 9)
- Oui, oui d'accord, tu veux dire le... ton second récipient que t'as ici... Enfin là on a réussi à sentir le truc mais pour quantifier... (débat 8).

Ceci vaut aussi bien pour certains protagonistes qui commencent par donner la bonne réponse comme une évidence⁴⁹, mais, ne parvenant pas à parer les objections de leur interlocuteur, basculent vite dans le doute :

- Normalement, toutes les particules qui sont à la même hauteur sont censées être à la même pression.
- Non, parce qu'on sait bien... Oui, c'est à la même hauteur, si c'est à la même hauteur au-dessus, mais ici (\backslash /) t'as une différence, t'as plus de poids, tu vois... t'as un poids plus grand, comme t'as un peu plus de poids, ben, ça appuie plus, forcément.
- Oui... logique... (débat 9).

On reconnaît aisément, dans cet extrait, l'une des difficultés classiques, assez peu exprimée dans ces débats⁵⁰. En fait, la plus présente (7 débats sur 9) s'exprime déjà sur un registre moins global : la pression dépendrait de la colonne d'eau ou « de boules » située juste au-dessus du point considéré⁵¹. Cette importance relativement faible du raisonnement global, au profit d'une analyse plus subtile, première avancée vers un raisonnement systémique complet, est probablement un effet de la séquence.

49 Même s'ils formulent la règle « même profondeur, même pression », les étudiants sont tout de suite prêts à la mettre en question et ils cherchent d'autres explications, plus liées à l'analyse des actions physiques (débat 1, trois fois, au début et vers la fin ; débat 5, deux fois ; débat 9, une fois au début).

50 L'argument est présent ici dans 6 débats sur 9, mais en général de façon très épisodique et au début ou au milieu du débat. Il n'est cité assez souvent que dans les débats 4 et 5, et il persiste alors presque jusqu'à la fin. Dans les débats 2, 8 et 9, il n'apparaît qu'une ou deux fois, et vite écarté, dans les deux derniers cas, au profit d'une discussion fondée sur les colonnes d'eau. Il est utilisé jusqu'à la moitié du débat 3.

51 Ce raisonnement est le plus fréquent parmi ceux que l'on observe (débats 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9). Il est très souvent utilisé avec le modèle des balles de mousse, en termes de « colonnes de boules ou billes » au-dessus. Il conduit, plus ou moins rapidement, à l'égalité des forces pour les récipients a \backslash / et b | _ | , mais laisse beaucoup de difficultés sur le cas c / _ \ , à cause des colonnes d'eau de différente hauteur aux bords du récipient.

Quant à l'idée qu'un liquide coincé dans un espace réduit ou dans un angle serait plus tassé, elle n'est évoquée ici que par un seul étudiant qui d'ailleurs change rapidement d'avis en faveur d'un raisonnement global : il n'y a là rien pour surprendre, puisque cette quasi-absence est déjà observée dans le groupe contrôle.

La présence d'entités *discrètes*, qui font référence au modèle de la séquence, est massive dans les débats. Les étudiants parlent en termes de billes, boules ou balles, parfois de molécules ou particules, de façon interchangeable. Plus précisément, dans tous les cas où une explication complète est recherchée⁵², des boules *jointives* apparaissent sur les dessins recueillis ou sont évoquées dans les transcriptions des débats. Tant que les boules sont dessinées ou imaginées comme éparées, le modèle n'est pas vraiment pris en charge dans le raisonnement des étudiants, il n'est sans doute qu'un souvenir visuel. Dès que des boules jointives apparaissent, il semble que ce modèle devienne opératoire et active un nouveau jeu de questionnement et d'argumentation. Reste à voir comment tout cela fonctionne.

Les forces d'interaction entre les boules, les actions de proche en proche, et l'image des boules qui poussent dans toutes les directions, tous éléments caractéristiques du modèle proposé, apparaissent souvent dans les débats, avec un rôle important, parfois décisif, dans le dénouement du conflit. Ainsi :

- Là tu vois si tu pousses plus fort, tu vas pousser plus fort sur celle-là, celle-là poussera plus fort sur la deuxième bille, la deuxième bille poussera plus fort sur la troisième, et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main (débat 7).
- Ces billes-là exercent une pression sur les bords ici sur ces billes-là, plus ou moins importante selon la hauteur, et de ce fait-là... Ah ben oui ! C'est bon ! Parce que de ce fait là, comme les molécules exercent... si elles reçoivent une pression d'un côté elles exercent les mêmes dans les trois dimensions, en fait la pression va être exercée... on va avoir la même pression exercée vers le bas aussi (débat 8).

La *compressibilité* ou la *déformabilité* des boules viennent parfois étayer l'argumentation (débats 4, 5, 6) :

- Parce que les boules ayant un certain poids, elles ont tendance à s'écraser donc à exercer une force latérale... horizontale sur les boules avoisinantes, cette force elle se transmet jusqu'aux parois et la paroi étant inclinée induit une force... vers le bas (débat 6).

52 C'est le cas dans tous les enregistrements, et 4 feuilles de réponse sans enregistrement. Trois feuilles de réponse sans enregistrement sont sans boules ou avec boules éparées, elles accompagnent une réponse correcte, mais celle-ci est peu argumentée ou s'accompagne d'une explication fautive : « la pression est constante dans le fluide ».

Les parois sont toujours prises en considération, même si ce n'est pas d'emblée, ou si une résistance se manifeste de prime abord, comme en témoigne cet échange entre l'enseignant et un étudiant :

- La paroi qui pousse...sur la dernière boule...
- Elle pousse ?⁵³ (débat 7).

Cette prise en compte du rôle des parois⁵⁴ est presque toujours fondamentale pour la résolution du problème. Elle apparaît souvent au milieu ou vers la fin du débat.

- Oui, non, elle vient appuyer là en fait, elle va appuyer sur la paroi et la paroi va appuyer là (débat 1, réplique n° 40).
- Ben donc ça donne quoi en bref ? Toutes les boules appuient verticalement sur la paroi, et comme y a une réaction de la paroi, ça dévie la force vers le centre... (débat 4, réplique n° 30).

À ce propos, on observe dans presque tous les débats des références explicites, parfois décisives, à des situations et des raisonnements caractéristiques de la séance de présentation du modèle. Ce peut être une allusion à une main qui pousse, avec éventuellement évocation du « plafond » ou autre aspect d'un « récipient complexe » :

- et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main (débat 7).
- pour ce qui est d'ici, on a suivi le même chemin de raisonnement que dans le cas où on avait fait un récipient complexe la dernière fois et... (débat 8).
- D'accord,... on va faire...comme l'histoire de la main qui appuie, quoi, parce que la force ne sera pas la même (débat 1).

Ces constats mettent en relief des aspects positifs bien probablement imputables à la séquence proposée, mais il arrive aussi que le modèle ne fonctionne pas comme appui à la compréhension, du fait d'une difficulté à analyser la mécanique des boules. Ainsi l'intervention de parois obliques a fait surgir la question de la décomposition des forces sur deux directions perpendiculaires⁵⁵. Lorsque celle-ci n'est pas du tout maîtrisée, on

53 On remarque la similitude de cette remarque avec celle citée au chapitre 2 : - le sol, il bouge pas, il peut pas pousser !

54 Parfois, les parois ne semblent avoir qu'une fonction de soutien ou de compensation du poids : - c'est qu'ici toute cette colonne d'eau, tout le poids de cette colonne d'eau va s'exercer sur la surface donc il y aura la même force, et toute l'eau qu'on a sur les bords va s'exercer sur les parois. Ce qui pourrait se passer, c'est que les parois explosent... (débat 8).

55 Les expressions « pression verticale », « pression horizontale » ou « composantes horizontale et verticale » de la force apparaissent (débats 1, 2, 4), et aussi « pression oblique », « composante oblique » (débat 2), force perpendiculaire à la paroi (débat 5). Ainsi : « Donc, t'as une pression verticale qui s'exerce dessus et t'as une pression horizontale de la paroi ou une pression, non, plutôt perpendiculaire, oui, c'est des pressions perpendiculaires...Ah mais voilà ! Si t'as une pression perpendiculaire, ça veut dire que ça, ça pousse comme ça, ici dans le deuxième cas, c'est tout à fait horizontal, et dans le troisième, ça pousse un peu vers le bas aussi, si tu la décomposes en une horizontale et une verticale, eh ben, t'as une partie qui pousse vers le bas, c'est pour ça que tes pressions seraient euh,... » (débat 2).

ne peut pas espérer que le modèle serve d'appui à une analyse systématique du fluide. Un tel blocage fut observé dans un débat (n° 4) qui s'est interminablement étendu sur cette question, sans aboutir. Parfois, c'est le professeur qui est intervenu pour suggérer une décomposition des forces exercées par les parois (débat 7, 9) à des étudiants qui semblaient dans une impasse. Ce qui est en cause ici est simplement le *seuil de compétence* qu'il faut atteindre pour mettre le modèle à profit dans une telle situation. En d'autres termes, un « pré-requis » est que les étudiants soient en mesure de manipuler la mécanique élémentaire des forces, et notamment, en cas de parois obliques, la décomposition vectorielle⁵⁶.

Un regard d'ensemble sur le déroulement de ces débats amène à remarquer que, sans résoudre toujours tous les problèmes, l'utilisation du modèle conduit les étudiants vers une argumentation plus articulée et productive, au fil du dialogue.

Un débat (n°8) est typique de ce point de vue. L'étudiant A soutient d'emblée la solution « plus d'eau, donc plus de force », tandis que B prône l'égalité des forces. Dès que B utilise le modèle, ses arguments deviennent plus riches :

B10 C'est là qu'on va en venir au modèle des boules, qu'est-ce qui va appuyer ici, c'est uniquement cette colonne d'eau, c'est elle qui va faire une force ici, donc la force sera la même que là, tu vois ce que je veux dire ? Donc ta pression aussi parce que cette paroi-là, cette, cette surface-là elle va pas éclater. Comme celle-là, si celle-là n'éclate pas elle n'éclatera pas non plus, tu vois ? Parce que qu'est-ce qui agit sur cette surface ici, c'est uniquement la colonne d'eau qui est située au-dessus, parce que tout le reste agit ici, et si tu veux, dans le cas où t'as ton truc, où t'as plus d'eau (récipient _ /), ça n'a aucune importance parce que toute l'eau que t'as ici elle va exercer une force sur la paroi. À la limite ce qui pourrait arriver, c'est que ton truc se casse comme ça, quoi.

Alors A ne trouve pas d'objection significative, ses interventions se réduisant à de courtes répliques :

A11 Oui, ça d'accord ! Là t'as raison.

A13 Mouais, mais c'est pas le cas.

A17 Attends...

Lorsque le professeur intervient, en posant une question, c'est B seulement qui répond. Finalement A réactive ses souvenirs :

⁵⁶ Si l'on rentre dans le détail de la relation entre pression et force, via la surface de contact, le cas des parois obliques devient plus difficile à expliquer dans ce modèle des boules. Mais, d'une part, les difficultés observées étaient bien en deçà de ce souci, d'autre part on peut envisager un modèle de paroi en accord avec celui des boules : une paroi en marches d'escalier à la mesure de la taille des boules ne pose plus aucun problème particulier. Le retour à la situation de paroi oblique continue se fait alors en diminuant simultanément la taille des marches et celles des boules.

A30 Là tu vois, c'est dans le cas, tu vois parce qu'on avait vu, la fois passée, d'une manière, on pousse vers le plafond, et l'autre, on la pousse vers le fond, et ça, c'est le premier cas, on va reprendre, et le troisième c'est...

B31 Ah oui ! Oui ! Tout à fait, oui, oui, oui.

A32 L'eau qu'y a ici, en fait, l'eau qu'y a ici (récipient / __ \), ta paroi va avoir une pression comme ça et c'est ça qui va faire la pression vers le bas aussi, mais euh attends...

On le voit, les discours, même s'ils restent encore flous, témoignent d'une analyse beaucoup plus fine qu'au début.

Bilan de l'évaluation menée auprès des étudiants

Les deux approches adoptées pour cette évaluation, l'une externe par questionnaires, l'autre interne via les débats, se rejoignent sur plusieurs points. On constate avant tout que ni l'idée simple de l'égalité de la pression à une même profondeur, ni la relation classique $\Delta p = -\rho g \Delta h$, ne sont suffisantes pour garantir une compréhension minimale des situations proposées. En témoignent les difficultés à analyser les interactions entre eau et rocher à propos de la situation « des poissons » et celles, importantes, générées par la situation des récipients de formes variées ou celle du ballon dans l'eau. C'est sur ces points que l'on observe une différence à la suite de cette courte séquence. Les scores obtenus pour des réponses fermées comme l'enrichissement progressif des débats enregistrés font apparaître le modèle proposé comme une aide notable à la compréhension, pourvu qu'un seuil minimum de compétence en mécanique élémentaire soit atteint. Les caractéristiques de ce modèle – au premier chef le caractère jointif des boules – apparaissent, à travers dialogues et dessins, comme supports efficaces pour l'analyse, ainsi que nous l'escomptions.

Pour autant, nul miracle. L'importante avancée enregistrée à propos des forces localement exercée par l'eau sur l'enveloppe d'un ballon immergé n'est pas automatiquement créditée sur l'interaction d'Archimède : ce prolongement immédiat est à expliciter auprès des étudiants.

Nul miracle, mais pourtant un bilan aussi positif n'était pas garanti d'avance, tant s'en faut, s'agissant d'une intervention aussi courte menée, c'est le moment de le souligner, par trois enseignants dont deux n'étaient pas parmi les concepteurs⁵⁷. Il ne semble pas non plus que des difficultés supplémentaires soient à prévoir, après cet épisode, pour la manipulation du modèle microscopique, lequel ne semble pas moins dis-

57 Les résultats obtenus dans les groupes d'étudiants de ces deux enseignants n'ont pas fait apparaître une moindre avancée dans la direction des objectifs des concepteurs.

ponible dans la population expérimentale que dans l'autre. Nos renseignements sur ce point mériteraient néanmoins confirmation.

Telle est notre appréciation des bénéfices et coûts de l'entreprise, après expérimentation auprès d'étudiants.

Nous disposons aussi de quelques éléments d'appréciation des réactions d'enseignants, après que ceux-ci aient eux-mêmes été amenés à suivre le parcours proposé par la séquence.

7

RÉACTIONS D'ENSEIGNANTS

Cette recherche récente laisse peu de recul pour juger des réactions d'enseignants. Nous disposons de commentaires de la part d'un groupe de 20 professeurs de Lycée et Collège en formation continue. Une première demi-journée avait été consacrée par l'enseignante⁵⁸ à un enseignement des bases de la mécanique à l'aide de « schémas éclatés » sur la base de ce qui est exposé en première partie du chapitre 2. Les situations impliquant des interactions de contact et la pesanteur avaient été ainsi analysées⁵⁹. L'après-midi fût consacré à une rapide situation du thème des fluides par rapport au programme de Seconde en cours avec une évocation des deux niveaux de description que l'on y présente, macroscopique et microscopique, puis à l'introduction du niveau mésoscopique via la séquence décrite plus haut, à quelques détails près.⁶⁰ Le questionnement, dans ce cas, s'est concentré sur les prises de position des enseignants sur leur éventuelle utilisation de cette séquence. Malgré l'absence de collecte formelle d'information sur le parcours conceptuel des enseignants, la séance du matin ainsi que la situation « des poissons » présentée en début de séance ayant suscité des discussions animées, il est patent que les éléments introduits dans cette formation n'étaient pas triviaux pour l'ensemble des enseignants concernés.

Sollicités par la question⁶¹ « aimeriez-vous utiliser cette séquence et si oui pour quels élèves ? », les enseignants se répartissent par tiers (respecti-

58 Françoise Chauvet, Maître de Conférences à l'IUFM Nord-Pas de Calais.

59 Une valise accélérée vers le haut par un voyageur, une masse oscillante au bout d'un ressort vertical, une boule trempée dans un verre d'eau lui-même sur une balance : voir chapitre 2.

60 La séquence a occupé une heure et demie, sans compter la consultation finale dont nous faisons état.

61 Entre autres : voir Besson 2001.

vement 6, 6 et 8) sur les trois positions suivantes : oui, peut-être pour certains élèves, non.

Les points positifs, dont la spécification était explicitement demandée, se concentrent sur les aspects suivants : caractère « concret », « visuel », simple de l'analogie d'une part (9/20 enseignants), mise en œuvre des bases de la mécanique avec au premier chef « la loi de l'action et de la réaction » d'autre part. L'exigeant retour sur la mécanique, plusieurs fois évoqué comme un aspect intéressant (8/20), arrive en tête des objections exprimées, au motif qu'il est trop difficile (12/20 dont 5 mentions de la troisième loi). Les opinions diffèrent : certains conseillent une adaptation du niveau (en Première ou en Terminale), d'autres en font un obstacle sans appel, d'autres demandent à voir, beaucoup évoquent le temps d'enseignement nécessaire (7/20).

Ainsi, à l'appui d'une réponse « Oui (pour élèves de lycée) » :

- *Point positif* : « notion Action-Réaction à maîtriser/connaitre. » ; *et point négatif* : « notion Action-Réaction à maîtriser. »

À l'appui d'une réponse « Non » :

- *Point positif* : « les points positifs sont pour nous. Ça nous a fait comprendre les difficultés des élèves à comprendre certaines notions. » ; *et point négatif* : « Étant professeur au collège, c'était difficile de se mettre dans le bain de la mécanique. »
- *Point négatif* : « Demande maîtrise d'une matière (maîtrise de la mécanique, pour l'apprentissage d'une nouvelle notion ! ⇒ échec immédiat pour des élèves déjà en difficulté ! » ; *et point positif* : « point positif = point négatif précédent car si on arrive à réinvestir des notions de mécanique, c'est super ! »

À l'appui d'une réponse « Peut-être » :

- *Point positif* : « Nous fait prendre conscience de la difficulté de l'introduction de cette notion, voire adapter son enseignement en utilisant des explications dans cet esprit. » ; *et point négatif* : « action-réaction : notion peu abordée, donc difficile d'utiliser cette méthode, ou alors il faudrait introduire action-réaction de manière très rigoureuse. »

Ainsi, il est intéressant d'observer qu'un même thème sert de base à l'argumentation dans les trois groupes d'enseignants dont la conclusion diffère, et qu'il apparaît même chez un individu donné (un quart de l'effectif) aussi bien comme aspect positif que dans la rubrique des inconvénients. L'objection est toujours posée en termes de difficulté, mais, s'agissant de concilier la compréhension d'aspects locaux et globaux d'un système fluide à l'équilibre en présence de gravité, aucun enseignant consulté ne va jusqu'à suggérer une autre voie, ou simplement dire que le rugueux passage par la mécanique puisse être évité. D'importants indices suggèrent que cette difficulté a été ressentie par certains professeurs eux-mêmes, ce que l'un d'entre eux exprime très simplement : « Étant pro-

fesseur au collège, c'était difficile de se mettre dans le bain de la mécanique ». Lorsqu'on éprouve soi-même – professeur expérimenté – la nécessité d'un effort pour comprendre, est-il aisé d'admettre que cela ne serait pas nécessairement un obstacle insurmontable pour des étudiants novices ? Nous reviendrons au chapitre 5 sur cette question, sans pour autant suggérer qu'un tel effet serait seul responsable des réticences observées.

8

CONCLUSION

Si l'on s'interroge sur l'intérêt et sur la manière d'enseigner les fluides en présence de gravité, cette séquence apporte des informations consistantes. Sa brièveté, sa mise en œuvre à grande échelle, y compris par des enseignants non associés à sa conception, en font un exemple d'intervention réaliste, sinon optimale. Il est probable que les bénéfices observés se maintiendraient lors d'autres expérimentations non particulièrement protégées. On pourrait évidemment la souhaiter mieux intégrée dans l'ensemble de l'enseignement de l'année, mieux préparée par l'usage antérieur de schémas éclatés, mieux suivie par ses prolongements naturels, c'est-à-dire, au premier chef, d'une part un travail sur l'interaction d'Archimède, pour relier le niveau mésoscopique à la relation intégrale bien connue, et d'autre part le mouvement opposé, vers l'interprétation microscopique de la répulsion entre éléments de fluide. Une telle mise en œuvre intégrée n'a pas encore été possible, mais cette circonstance apporte ses bénéfices propres. En effet, il est ainsi possible d'observer d'une part les effets positifs (dans le sens des objectifs visés, s'entend) d'une séquence facilement intégrable dans un enseignement standard, d'autre part ses limites. Les bénéfices observés deviennent d'une certaine façon plus crédibles lorsqu'on en constate aussi les limites. Si, caricaturant certaines « évaluations » de séquence triomphales, on était tenté d'ironiser, arguant que l'enseignant était motivé, enthousiaste, à l'aise parce que sachant bien ce qu'il devait faire et enfin séducteur, et qu'en conséquence il n'y avait rien de surprenant à observer quelque avantage chez les élèves « expérimentaux », il faut bien constater ici que les charmes et les élans de l'innovation n'ont pas suffi à faire franchir certaines étapes conceptuelles. Dans cette expérimentation, le choix du niveau mésoscopique de modélisation, avec contact entre les éléments de base figurant les constituants du fluide, a conduit les étudiants à mettre en œuvre, de façon plus élaborée, une analyse systémique des situations proposées, associant leurs caractéristiques locales et globales. En revanche, la relation entre

valeurs locales de pression et l'interaction d'Archimède, relation préalablement enseignée en cours magistral, ne s'est pas d'elle-même, dans la foulée, inscrite parmi les éléments conceptuels maîtrisés.

Sauf à expérimenter des versions successives d'une séquence (voir le chapitre suivant), il est difficile de séparer, dans les effets produits, l'impact de chacun des paramètres la définissant. Ce que cette étude permet de détailler de manière relativement précise, ce sont les acquis conceptuels qu'on peut attendre dans un format donné, assemblage cohérent de plusieurs types d'action. On vient de rappeler que les effets positifs attendus à propos de l'analyse de l'action d'un fluide sur un corps immergé étaient bien observés, tandis que l'insertion de la poussée d'Archimède dans ce cadre conceptuel, non abordée dans la séquence, restait à l'écart de la progression conceptuelle, et cantonnée dans cette vision globale, non analysée, que suggère la formule miracle associée. Encore une fois, l'un des prolongements évidemment souhaitables de la séquence, complètement préparé par sa forme déjà expérimentée⁶², est de traiter ce point.

Il est bien instructif également de mesurer combien un refrain peut être acquis très majoritairement, tel celui qui concerne la pression dans un liquide à même profondeur, et laisser tant d'étudiants démunis devant une analyse du phénomène qui prenne en compte l'ensemble du système, non pas comme un tout dont on dit « il faut bien que », mais comme un ensemble d'interactions locales mutuellement conciliées. Le succès de la séquence n'est pas tant dans l'augmentation des pourcentages d'étudiants qui donnent des réponses « correctes », que dans les interrogations qu'elle suscite y compris chez les détenteurs de « bonnes réponses », et qu'elle permet de résoudre, comme en témoignent les débats.

Autre aspect d'évaluation à considérer, et ce sera l'un des éléments d'information fournis particulièrement par le chapitre 5, on peut sans doute parler d'une hiérarchie de plus ou moins grande acceptabilité auprès des enseignants pour divers ingrédients envisageables dans la définition d'une séquence. De ce point de vue, cette étude sur les fluides en présence de gravité n'est pas très avancée, puisque nous n'avons recueilli que quelques éléments d'information sur les réactions d'enseignants. Ceci est le reflet de la jeunesse de ce thème dans la recherche didactique, et du temps qu'il faut pour effectuer le parcours complet depuis les études de raisonnements jusqu'à l'évaluation de la séquence dans tous ses aspects. Les informations dont nous disposons, pour limitées qu'elles soient, dressent un tableau qui pourrait se révéler relativement commun à propos de suggestions d'innovation fondées sur la recherche didactique. En bref : « c'est intéressant, mais c'est difficile et cela prend du temps ». Sachant que les enseignants consultés n'avaient pas accès aux résultats de l'éva-

62 Ce sont des contraintes de contexte, en particulier de temps, qui n'ont pas permis ce prolongement.

luation rapportée plus haut et venaient d'être initiés à la séquence, ils en ont reconnu l'intérêt sur la base de leur vécu personnel, et sans doute peut-on en dire autant de la difficulté qu'ils évoquent. Le « temps que cela prend », qui fut un peu supérieur pour ces enseignants – trois heures – à ce qu'il fut pour les étudiants de notre expérimentation – deux heures et demie –, est en fait si limité que l'on reste rêveur devant ce sentiment de paralysie. On ne peut penser agir qu'à la marge, dans ces conditions, sauf à montrer le potentiel de réinvestissement généré par ce type de proposition. Revenir sur les bases de la mécanique est coûteux mais si une avancée se faisait à propos des fluides, c'est, par exemple, la proposition sur les frottements qui verrait son application facilitée. « Si on arrive à réinvestir les notions de mécanique, c'est super ! », nous dit l'un des professeurs consultés. Peut-être est-ce bien là, en définitive, un facteur-clef de l'adoption de toute proposition didactique : pouvoir réinvestir.

RÉFÉRENCES

- Andersson, B. 1986. The experiential Gestalt of Causation : a common core to pupils preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8 (2), pp. 155-171.
- Andersson B., Bach F. 1996. Developing New Teaching Sequences in Science : The Example of « Gases and Their Properties ». In G. Welford, J. Osborne J. & P. Scott (Éds.) : *Research in Science Education in Europe, Current Issues and Themes*, Londres : The Falmer Press.
- Besson, U. 1990. *Una ricerca didattica sul concetto di pressione*, Tesi di laurea, Université de Rome.
- Besson, U. 1995. La pressione. *La Fisica nella scuola*, 28 (1), pp. 8-14.
- Besson, U. 1997. *La pression dans les fluides*, Mémoire de DEA de Didactique des disciplines, Université Denis Diderot (Paris 7).
- Besson, U. 2001. *Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement*, Thèse de Doctorat en Didactique des Disciplines, Université Denis Diderot (Paris 7).
- Besson, U., Lega, J. & Viennot, L. 2001a. Using anchoring conceptions for teaching statics of fluids. In R. Pinto and R. Surinach (Eds) : *Physics Teacher Education Beyond 2000*, Selected contributions to International Conference : GIREP 2000, Barcelona, Paris : Elsevier, pp. 281-284.
- Besson U., Viennot L. & Lega J. 2001b. « A mesoscopic model of liquids for teaching statics of fluids ». In R. Pinto & R. Surinach (Eds) : *Science Education Research in the Knowledge Based Society, Proceedings of the Third International Conference of ESERA, Thessaloniki*, pp. 304-306.
- Borghi, L., De Ambrosis, C., Invernizzi, P. & Mascheretti, P. 1996. Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides, *Didaskalia*, 8, pp. 139-153.
- Brasquet, M. 1999. Actions, interactions et schématisation, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°816, pp. 1220-1236.

- Brook, A., Briggs, H. & Driver, R. 1984. *Aspects of the secondary students' understanding of the particular nature of matter*. Children's Learning in Science Project, Center for Studies in Science and Mathematics Education. University of Leeds, Leeds.
- Cantelaube, F. 1997. Le trou du tas de sable, *Bulletin de la Société Française de Physique*, 108, pp.3-6.
- Cates, M.E., Wittmer, J.P., Bouchaud J.-P. & Claudin P. 1999. Jamming and static stress transmission in granular materials, *Chaos*, 9 (3), pp. 511-522.
- Chomat, A., Larcher, C. & Méheut, M. 1988. Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster* 7, pp. 143-184.
- Clement, J., Brown, D. & Zietsman, A. 1989. Not all Preconceptions are Misconceptions : Finding « Anchoring Conceptions » for Grounding Instruction on Students' Intuitions, *International Journal of Science Education*, 11 (5), pp. 554-565.
- Diu, B. 1997. *Les atomes existent-ils vraiment ?* Paris : Odile Jacob.
- Diu, B., Guthmann, C. Lederer, D. & Roulet, B. 1989, *Physique statistique*, Paris : Hermann
- Duhem, P. 1903. *L'évolution de la mécanique*, édité par A. Brenner (1992), Paris : Vrin
- Engel, E. & Driver, R. 1985. What do Children Understand about Pressure in Fluids ? *Research in Science and Technological Education*, 3, pp. 133-144.
- Eylon, S. & Ganiel, U. 1990. Macro-micro relationships : the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning, *International Journal of Science Education*, 12 (1), pp. 79-94.
- Giese, P.A. 1987. Misconceptions about Water Pressure, *Proceedings of 2nd International Seminar*, Ithaca, Cornell University, 2, pp. 143-148.
- Guyon, E., Hulin, J.P. & Petit, L. 1991. *Hydrodynamique physique*, Paris : InterEditions et CNRS éditions.
- Härtel, H. 1993. New approach to introduce Basic Concepts in Electricity. In M. Caillot (Ed.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, NATO ASI Series F, 115, pp. 5-21, Berlin : Springer-Verlag.
- Jacquot, D. 2000. Conceptions de l'état gazeux et de la pression des élèves entrant en Seconde, Mémoire de Tutorat, DEA de Didactique Université Paris 7.
- Kariotoglou, P. & Psillos, D. 1993. Pupils' Pressure Models and their Implications for Instruction, *Research in Science and Technological Education*, vol.11, pp. 95-108.
- Kariotoglou, P., Koumaras, P. & Psillos, D. 1995. Différentiation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique, fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves, *Didaskalia*, n°7, pp. 63-90.
- Larcher, C., Chomat, A. & Méheut, M. 1988. Modèle particulière et activité de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, pp. 143-194.
- Locqueneux, R. 2001. Les théories physiques aux environs de 1900. In *Physique et humanités scientifiques. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902*. N. Hulin (Ed.), Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- 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. 1996. Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège, *Didaskalia*, n°8, pp. 7-32.
- Méheut, M. 1997. Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases : the parts played by questions and by a computer simulation. *International Journal of Science Education*, 19 (2), pp. 647-660.
- Ministère de l'Éducation Nationale, 1999. Programme de la classe de Seconde Générale et Technologique. *Bulletin officiel* n°6 Hors Série, pp. 5-23.

- Ministère de l'Éducation Nationale, 2000. *Document d'accompagnement du programme de la classe de Seconde Générale et Technologique, Physique et Chimie* : CNDP.
- Piaget, J. & Inhelder, B. 1955. *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. & Garcia, R. 1971. *Les explications causales*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Psillos, D. 1995. Adapting Instruction to Students' Reasoning. In D. Psillos (ed.), « *European Research in Science Education* ». Proceedings of the second PhD Summerschool. Leptokaria, Thessaloniki : Art of Text, pp. 57-71.
- Pugliese Jona, S. 1984. *Fisica e laboratorio*, Vol.1, Turin : Loescher.
- Rainson, S. 1995. *Superposition des champs électriques et causalité : Étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques*, thèse, Université Denis Diderot (Paris 7).
- Rozier, S. 1988. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Denis Diderot (Paris 7).
- Rozier, S. & Viennot, L. 1991. Students' Reasoning in Thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 13 (2), pp. 159-170.
- Savage, S.B. 1998. Physics of dry Granular Media ». In Hermann, Heri, Luding (Éds.) : *Modeling and Granular Material Boundary Value Problems*. NATO ASI Series. Dordrecht : Kluwer, pp. 25-95.
- Séré, M.G. 1982. A Study of some Frameworks Used by Pupils Aged 11 to 13 Years in the Interpretation of Air Pressure, *European Journal of Science Education*, 4 (3), pp. 299-309.
- Séré, M.G. 1986. Children's Conceptions of the Gaseous State, *European Journal of Science Education*, 8 (4), pp. 413-425.
- Sherwood, B.A. & Chabay, R.W. (1993). Electrical Interactions and the Atomic Structure of Matter. In M. Caillot (Ed.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, NATO ASI Series F, 115, pp. 23-35, Berlin : Springer-Verlag.
- Tiberghien, A. 1997. Modelling as a basis for analysing teaching learning situations. *Learning and Instruction*, 4, pp. 71-87.
- Viennot, L. 1996. *Raisonnement en Physique, la part du sens commun*. Bruxelles : De Boeck (ou 2001 : *Reasoning in Physics, the Part of Common Sense*, Dordrecht : Kluwer).
- Viennot, L. & Chauvet, F. 1997. Two dimensions to characterize research based teaching strategies : examples in elementary optics. *International Journal of Science Education*, 19 (10), pp. 1159-1168.
- Vollebregt, M. 1998. *A Problem Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model*. Utrecht : CD-β press.

ANNEXE

Principaux résultats de l'évaluation externe

A. Résultats du pré-test : « Récipients » (réponses fermées, an 2000)

Question 1

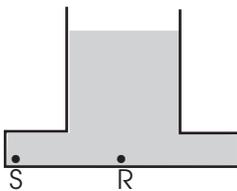
Comparer la force exercée par l'eau sur le fond, d'aire identique, de trois récipients différents remplis au même niveau |_ | /_ \ _ /

Réponse exacte : forces égales.

| Groupe | Forces égales | | Force plus grande en _ | | Force plus grande en /_ \ | | Force plus grande en _ / | | NR | Total |
|--------------|---------------|------|-------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|------|----|-------|
| expérimental | 43 | 25 % | 1 | 0,6 % | 13 | 7,7 % | 110 | 65 % | 2 | 169 |
| de contrôle | 24 | 26 % | 3 | 3,2 % | 6 | 6,4 % | 60 | 64 % | 1 | 94 |
| Total | 67 | 25 % | 4 | 1,5 % | 19 | 7 % | 170 | 65 % | 3 | 263 |

Question 2

Comparer la pression en deux points S, R dans un récipient plein d'eau



Réponse exacte : pressions égales en S et en R

| Groupe | $p(s) = p(R)$ | | $p(S) < p(R)$ | | $p(S) > p(R)$ | | NR | Total |
|--------------|---------------|------|---------------|------|---------------|------|----|-------|
| expérimental | 128 | 76 % | 20 | 12 % | 20 | 12 % | 1 | 169 |
| de contrôle | 65 | 69 % | 17 | 18 % | 11 | 12 % | 1 | 94 |
| Total | 193 | 73 % | 37 | 14 % | 31 | 12 % | 2 | 263 |

B. Résultats du post-test : « Poissons » (réponses fermées, an 2000)

Le texte complet du questionnaire est en encadré 2.

Question 1

Comparer la pression pour deux poissons, l'un en pleine mer et l'autre dans une grotte à même profondeur.

| Groupe | Pression égale | | Pression plus grande dans la grotte | | Pression plus grande en pleine mer | | NR | Total |
|--------------|----------------|------|-------------------------------------|-----|------------------------------------|------|----|-------|
| | | | | | | | | |
| expérimental | 137 | 81 % | 11 | 7 % | 21 | 12 % | 0 | 169 |
| de contrôle | 66 | 70 % | 6 | 6 % | 21 | 22 % | 1 | 94 |
| Total | 203 | 77 % | 17 | 6 % | 42 | 16 % | 1 | 263 |

En regroupant en deux catégories seulement, réponses correctes et autres, on obtient :

$\chi^2 = 4,0$ soit une différence entre les deux groupes significative au niveau $p = 4,4 \%$.

Question 3

En haut de la grotte l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ?

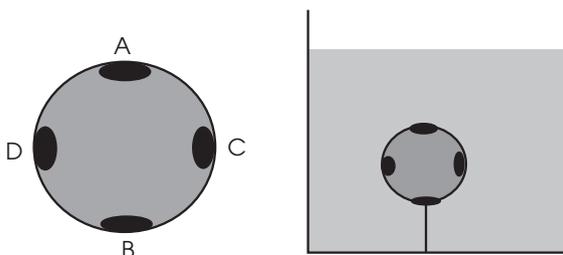
| Groupe | Force de l'eau sur le rocher en haut de la grotte | | | | | | |
|--------------|---|------|-----|------|----|-----|-------|
| | Oui | | Non | | NR | | Total |
| expérimental | 143 | 85 % | 13 | 8 % | 13 | 8 % | 169 |
| de contrôle | 76 | 81 % | 12 | 13 % | 6 | 6 % | 94 |
| Total | 219 | 83 % | 25 | 10 % | 19 | 7 % | 263 |

En regroupant en deux catégories seulement, réponses « oui » et autres, on obtient :

$\chi^2 = 4,0$ soit une différence entre les deux groupes significative au niveau $p = 4,5 \%$.

C. Résultats du post-test : « Ballon dans l'eau » (réponses fermées, an 2000)

Un ballon de foot est tenu immergé dans l'eau. Quatre disques identiques y sont dessinés, en haut A, en bas B, à droite C, à gauche D.



Question 1

L'eau exerce-t-elle une force sur A, B, C, D ?

Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe contrôle | |
|----------|--|---------------------|-------|-----------------|-------|
| a | correcte | 98 | 58 % | 31 | 33 % |
| b | $F(B) > F(A) ;$ $F(C) = F(D)$ | 10 | 6 % | 11 | 12 % |
| c | $F(B) > F(A) = F(C) = F(D)$ | 4 | 2 % | 4 | 4 % |
| d | seules $F(B) > F(A)$ | 10 | 6 % | 6 | 6 % |
| e | 4 forces égales | 12 | 7 % | 16 | 17 % |
| f | seule $F(B)$ | 1 | 1 % | 4 | 4 % |
| g | $F(A) > F(C) = F(D) > F(B)$ ou $F(A)$ plus grande | 3 | 2 % | 5 | 5 % |
| | autres | 20 | 12 % | 17 | 18 % |
| | Non réponses | 11 | 7 % | 0 | 0 % |
| | Total | 169 | 100 % | 94 | 100 % |

En regroupant en deux catégories seulement, réponses correctes et complètes **a** et les autres, on obtient $\chi^2 = 15$, soit une différence entre les deux groupes significative au niveau $p = 0,01$ %.

En regroupant les réponses correctes ou presque **a+b** et les autres, on obtient $\chi^2 = 9,1$ soit une différence entre les deux groupes significative au niveau $p = 0,25$ %.

Question 2

Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

| | La poussée d'Archimède | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
|-------------|---|---------------------|-------|--------------------|-------|
| a, b | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 38 | 22 % | 23 | 24 % |
| c, d | est la force en bas (en B), a à voir avec la seule force en B | 46 | 27 % | 23 | 24 % |
| e | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 23 | 14 % | 12 | 13 % |
| f | réponse « oui », mais sans justifications ou avec justifications génériques, pas claires ou non pertinentes | 41 | 24 % | 23 | 24 % |
| | autres | 4 | 2 % | 4 | 4 % |
| | Non réponses | 17 | 10 % | 9 | 10 % |
| | Total | 169 | 100 % | 94 | 100 % |

D. Résultats du post-test : « Seringue » (réponses fermées, an 2000)

Question 1 et 2

On ferme le bout d'une seringue pleine d'eau.

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente, diminue ou reste inchangée ? Et le volume augmente, diminue ou reste inchangé ?

| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe contrôle | |
|----------|--|---------------------|-------|-----------------|-------|
| a | $p \uparrow V \downarrow$ | 31 | 18 % | 22 | 23 % |
| b | $p \uparrow V \downarrow \cong$ ou $p \uparrow \cong V \downarrow \cong$ | 53 | 31 % | 13 | 14 % |
| c | $p \uparrow V =$ | 62 | 37 % | 41 | 44 % |
| d | $p = V =$ | 14 | 8 % | 14 | 15 % |
| e | $p = V \downarrow$ ou $V \downarrow \cong$ | 3 | 2 % | 2 | 2 % |
| f | autres | 3 | 2 % | 0 | 0 % |
| | Incomplètes ou pas claires | 3 | 2 % | 2 | 2 % |
| | Total réponses | 169 | 100 % | 94 | 100 % |

En regroupant les réponses en deux catégories seulement, ceux qui envisagent une diminution de volume et tous les autres, on obtient $\chi^2 = 9,0$: différence significative au niveau $p = 0,3$ %.

En regroupant ceux qui envisagent une diminution de volume très petite et tous les autres, on obtient $\chi^2 = 25$: différence significative au niveau $p = 0,01$ %.

E. Résultats du post-test : « Casserole » (réponses fermées, an 1999)

Ce questionnaire a été donné seulement en 1999.

Dans une casserole il y a de l'eau.

Question 1 :

Les molécules de l'eau choquent-elles les parois de la casserole ?

| | oui | | non | | NR | Total |
|---------------------|-----|------|-----|------|----|-------|
| Groupe expérimental | 55 | 83 % | 11 | 17 % | 2 | 68 |
| Groupe de contrôle | 58 | 88 % | 8 | 12 % | 8 | 74 |
| Total | 113 | 86 % | 19 | 14 % | 10 | 142 |

Comparaison entre les deux groupes : on trouve $\chi^2 = 0,55$, soit une différence nettement non significative, même au niveau 50 %.

Question 2 :

Si l'on chauffe l'eau, la pression de l'eau change-t-elle ? Si oui, augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?

Comparaison entre les deux groupes, selon qu'ils ont donné ou non des justifications en termes de cinétique moléculaire, en utilisant les molécules de l'eau :

| | Utilisation du modèle moléculaire cinétique dans les justifications | | | | Total |
|---------------------|---|------|-----|------|-------|
| | oui | | non | | |
| Groupe expérimental | 28 | 54 % | 24 | 46 % | 52 |
| Groupe de contrôle | 19 | 38 % | 31 | 62 % | 50 |
| Total | 47 | 46 % | 55 | 54 % | 102 |

La différence n'est pas significative ($\chi^2 = 2,5$, niveau 15 %).