

Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides

L. BORGHI, A. DE AMBROSIS,
C. INVERNIZZI, P. MASCHERETTI

Département de Physique «A. Volta»
Università di Pavia
Via Bassi, 6
27100 Pavia, Italie.

Résumé

Cet article présente une proposition didactique visant à favoriser la compréhension des concepts physiques relatifs à l'hydrostatique et en particulier au principe de Pascal. La proposition, qui est insérée dans un contexte d'hypertexte, se fonde sur l'utilisation d'un modèle qui rend compte des propriétés fondamentales d'un liquide, comme son action sur les parois du récipient qui le contient ou la transmission isotrope des forces qui s'exercent sur lui. Les affinements successifs du modèle permettent d'aboutir à la définition de la pression dans les liquides.

Mots clés : pression, hydrostatique, expériences, simulation, hypertexte.

Abstract

In this paper a proposal aimed at favouring the understanding of fundamentals of hydrostatics, with particular attention to the Pascal principle, is presented. The instruction material was developed in a hypertextual environment and based on a model which explains static properties of liquids. Particular attention is given to the isotropic transmission of forces inside a liquid and to its action on the walls of the container. The model, with appropriate adjustments, can lead to define pressure.

Key words : *pressure, hydrostatics, experiments, simulation, hypertext.*

Resumen

Este artículo presenta una proposición didáctica aspirando favorecer la comprensión de los conceptos físicos relativos a la hidrostática y en particular al principio de Pascal. La proposición, que es enmarcada en un contexto de hypertexto, se fundamenta en la utilización de un modelo que rinde cuenta de las propiedades fundamentales de un líquido, como su acción sobre las paredes de un recipiente que lo contiene o la transmisión isótropa de las fuerzas que se ejercen sobre él. Los afinamientos progresivos del modelo permiten conducir a la definición de presión en los líquidos.

Palabras claves : *presión, hidrostática, experiencias, simulación, hypertexto.*

INTRODUCTION

Nous avons présenté dans un précédent article le schéma général d'un environnement multimédia visant l'étude des propriétés physiques des fluides au repos, réalisé avec une approche hypertextuelle (Borghi & al., 1993). Les différentes voies que cet environnement permet de suivre ont comme points de repère les travaux de Boyle sur la compression et la dilatation de l'air à température constante. Ceci implique donc des problèmes connexes mettant en jeu différents concepts de base, comme ceux de pression (dans des liquides et des gaz), de transmission de forces dans ces fluides, d'effet de la gravité sur les conditions de pression par exemple.

L'hypertexte est structuré en plusieurs sections consacrées aux différents points de vue selon lesquels le sujet principal peut être considéré. Une de ces sections, intitulée «Faut-il plus de physique ?» a été conçue pour aider à éclaircir et approfondir les concepts physiques nécessaires pour suivre un parcours significatif et cohérent quel que soit le niveau d'investigation choisi par l'utilisateur. Parmi ces concepts, l'action d'un liquide sur les parois du récipient qui le contient et la transmission isotrope à l'intérieur du liquide des forces qui s'exercent sur lui ont une importance fondamentale. Ces concepts sont tous les deux essentiels pour la définition de la pression. Notre proposition peut aider à résoudre quelques-uns des problèmes relatifs à leur compréhension, signalés dans la littérature comme constituant de considérables difficultés pour des étudiants à différents niveaux de scolarité (Séré, 1982 ; Engel-Clough & Driver, 1985 ; Ruggiero & al., 1985 ; Rollnick & Rutherford, 1990, 1993 ; de Berg, 1992 ; Kariotoglou & al., 1993). Ces difficultés sont, à notre avis, une conséquence du fait que la pression n'est pas un concept primaire, mais joue un rôle d'organisateur

cognitif extraordinairement utile à la description d'un grand nombre de phénoménologies des fluides. C'est pourquoi il doit être introduit explicitement dans un parcours didactique, et il faut mettre en évidence sa fonction dans les différentes circonstances où un fluide peut être étudié. De ce point de vue, dans le cas des conditions statiques de l'étude d'un fluide, il y a essentiellement trois problèmes. Nous les énumérons dans l'ordre de l'histoire de la pensée scientifique, essentiellement pour les liquides :

- l'analyse de l'action qu'un fluide exerce sur un objet qui y est plongé (principe d'Archimède) ;

- l'étude des conséquences du poids sur le fluide même (principe de Stévin) ;

- la description du comportement d'un fluide soumis à des forces extérieures, en faisant abstraction de son poids (principe de Pascal).

Ce dernier problème met en jeu les caractéristiques les plus intrinsèques du comportement d'un fluide, c'est pourquoi nous avons établi une hiérarchie en fonction de la simplicité des situations, qui est opposée à l'évolution historique.

En effet, dans l'hypertexte, nous utilisons des modèles qui, en suggérant une représentation du liquide à l'échelle microscopique, permettent d'en expliquer les comportements phénoménologiques connexes avec le principe de Pascal. Différents exemples de ces phénoménologies sont analysées en intégrant deux approches : l'une liée à l'observation et à l'expérimental, l'autre liée au représentatif et à l'informatique. La première utilise des dispositifs simples visant à reproduire des phénomènes significatifs du comportement statique des liquides comprimés ; l'autre, basée sur des animations et des simulations, reprend l'analyse des phénomènes en introduisant les éléments conceptuels (par exemple la représentation des forces avec des vecteurs) qui tendent vers une description formalisée du monde physique.

Dans la suite, nous nous bornons à illustrer le modèle du liquide et à préciser son utilisation pour arriver à la définition de pression dans les liquides, ainsi qu'aux caractéristiques qui rendent ce concept suffisamment opératoire sur les points correspondant aux difficultés de compréhension signalées dans la littérature. Les limites de validité de ce modèle seront mises en évidence, avec la nécessité de le modifier foncièrement pour rendre compte de la pression dans les gaz.

LE MODÈLE

Parmi les propriétés microscopiques responsables du comportement statique d'un liquide, comme chacun sait, la plus importante est le fait que l'interaction entre ses molécules permet des glissements des unes par rapport aux autres. Cela se traduit macroscopiquement par l'impossibilité de contraintes de cisaillement dans un liquide. Cette propriété différencie profondément le comportement des liquides de celui des solides. En effet, dans ces derniers, les interactions qui donnent lieu à l'ordonnement de la structure réticulaire sont aussi responsables de la possibilité de transmettre des contraintes de cisaillement. Cet ensemble de considérations permet de proposer, pour un liquide en conditions statiques, un modèle constitué de petites sphères au contact entre elles, et entre lesquelles seules des forces perpendiculaires aux surfaces des points de contact sont exercées, ce qui suppose qu'entre les petites sphères il n'y a pas de frottement de glissement. Si les petites sphères sont contenues dans un récipient, et que l'on suppose l'absence de frottement entre les sphères et les parois, elles exercent aussi sur le récipient des forces normales aux surfaces aux points de contact (Bisi & Mascheretti, 1988).

Le modèle est construit graduellement en partant d'une situation très simple et en introduisant petit à petit des caractéristiques qui accroissent son pouvoir descriptif. Ce développement se fait aussi bien par le moyen d'animations que par le moyen d'objets réels, avec des situations bidimensionnelles, où les petites sphères sont remplacées par des disques.

Une première animation présente trois disques rigides (indiqués par A, B, C) ; sur l'un d'entre eux (A) est appliquée une force (figure 1).

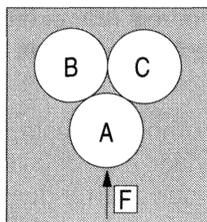


Figure 1 : **Modèle à trois disques rigides (animation)**

On met en évidence que A ne pousse B et C que le long des lignes joignant les centres en provoquant l'éloignement entre B et C, entre lesquels il n'y a pas de liaisons. Cela est dû au fait que la force sur A donne naissance à deux forces appliquées à B et à C qui ont une direction différente de la première (naturellement, leur intensité peut être déduite grâce aux règles de décomposition des forces).

Si les deux disques B et C ne peuvent pas s'éloigner parce qu'ils sont à l'intérieur d'un récipient, ils poussent sur les parois en exerçant des forces ayant une direction normale à celles-ci (figure 2).

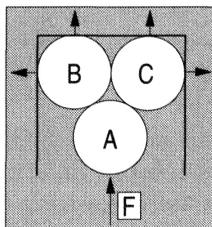


Figure 2 : **Disques rigides dans un récipient à parois rectangulaires**

En augmentant la force sur A, les forces exercées sur les parois augmentent en proportion. L'animation permet de se rendre compte du fait que, en changeant la disposition des parois, on change aussi l'orientation des forces que les disques exercent sur ces parois (figure 3).

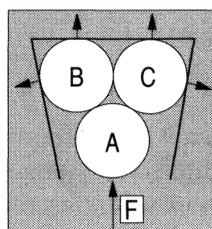


Figure 3 : **Récipient à parois obliques**

Du fait de la poussée sur A et de l'inclinaison des parois latérales, chaque disque pousse autant contre son voisin que contre les parois. Dans ce cas également, en augmentant la force sur A, les forces sur les parois augmentent en proportion.

On propose d'observer concrètement le comportement des disques des animations en utilisant le simple dispositif illustré dans la figure 4, où les disques sont constitués par trois pions d'un jeu de «dames».

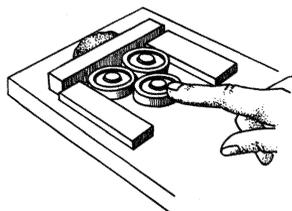


Figure 4 : **Dispositif avec trois pions d'un jeu de dames**

La petite planche du fond est fixée au plan d'appui avec de la pâte à modeler, tandis que les deux petites planches latérales peuvent être libres de se déplacer quand les disques poussent sur elles, ou bien être fixées avec de la pâte à modeler.

Tout en étant très simple, le modèle, sous cette première forme, peut déjà suggérer une explication des propriétés fondamentales d'un liquide :

– dans le cas où les parois latérales sont libres, le liquide «répond» à des actions extérieures en se déplaçant dans des directions indépendantes de celle de la force appliquée de l'extérieur ;

– dans le cas où toutes les parois sont fixées, le modèle rappelle le comportement d'un liquide qui, soumis à une force extérieure quand il est renfermé dans un récipient, transmet des forces aux parois.

Ces deux caractéristiques d'un liquide soit sont difficiles à interpréter, soit ne sont tout simplement pas prises en compte par les étudiants.

Le modèle à trois disques est trop simple pour rendre compte du comportement d'un liquide et, plus particulièrement, pour expliquer le fait que les forces appliquées de l'extérieur se transmettent aux parois à travers le liquide sans changement d'intensité.

Pour retrouver cet aspect il faut recourir à un nombre plus élevé de disques et à des configurations désordonnées. C'est pourquoi une animation propose tout d'abord la situation où un certain nombre de disques sont confinés dans un «couloir» aux parois rigides, de forme semi-circulaire, fermé à une extrémité et assez étroit (figure 5).

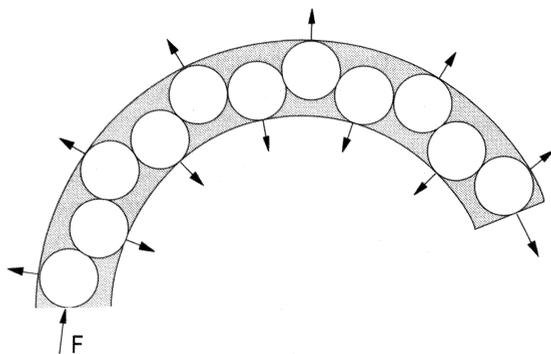


Figure 5 : Ensemble de disques enfermés dans un récipient rigide semi-circulaire

On constate facilement que, dans ce cas, en appuyant sur le premier disque, on obtient une configuration stable dans laquelle chaque disque exerce une force normale à la paroi qu'il touche et dans le même temps une force sur son voisin. Cet exemple montre nettement comment une action extérieure provoque une distribution de forces dont les directions sont indépendantes de celle de la force extérieure tandis qu'elles dépendent de la géométrie du système : c'est une caractéristique du comportement des liquides que la littérature signale comme difficile à comprendre par les étudiants (Engel-Clough & Driver, 1985 ; Kariotoglou et al., 1993).

Pour approfondir l'analyse sur l'intensité des forces, il est utile de considérer des récipients à parois pleines et un nombre de disques de plus en plus grand. C'est pourquoi nous proposons d'abord le dispositif illustré à la figure 6.

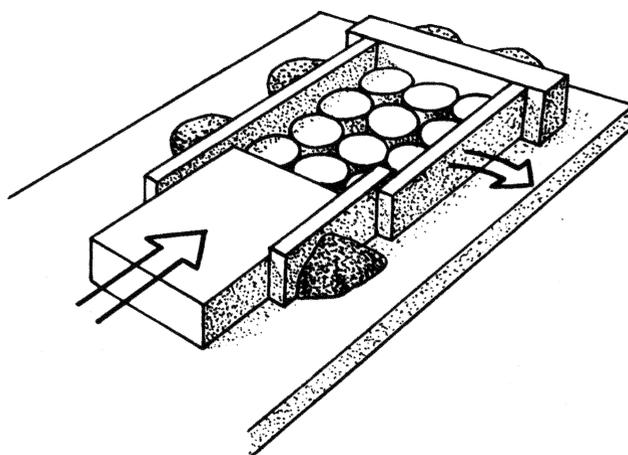


Figure 6 : **Dispositif mettant en évidence l'action des disques comprimés sur une paroi mobile**

Un certain nombre de pions du jeu de dames sont enfermés dans un récipient où elles peuvent être poussées par une sorte de piston. En poussant sur le piston, on génère des forces sur les pions au contact du piston qui sont transmises aux parois : une portion de paroi est mobile et, sous la poussée latérale des pions, elle se déplace en les laissant sortir.

Une animation visualise la distribution des forces exercées par les pions sur les parois avec environ cinquante disques contenus dans un récipient à trois parois orthogonales. Initialement la disposition des disques est ordonnée (figure 7).

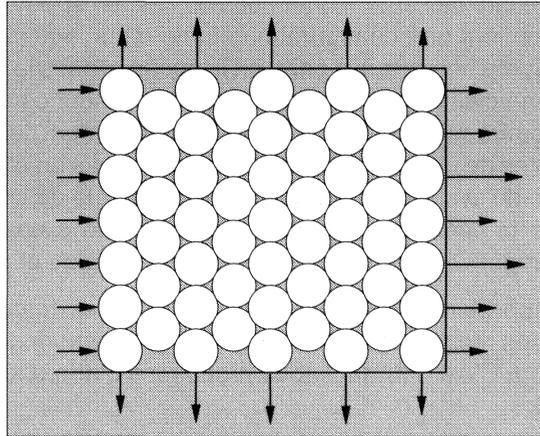


Figure 7 : **Disques disposés de façon ordonnée**

Aux disques du premier rang sont appliquées des forces égales qui se transmettent aux parois du récipient.

L'animation met en évidence que les forces exercées sur les parois de chaque disque n'ont pas toutes la même intensité, mais varient de façon régulière : il y a une nette différence entre les parois latérales et celle du fond. Cela est dû à l'ordre de disposition des disques (chacun d'eux est entouré de six disques disposés aux sommets d'un hexagone régulier). Du fait de cette disposition, les directions le long desquelles les forces se transmettent sont en nombre limité et parfaitement déterminables.

Si les disques remplissent au contraire le récipient d'une façon désordonnée (comme le montre l'animation dont une illustration est présentée à la figure 8), la position de chaque disque par rapport à ses premiers voisins est fortuite, et on a donc un changement de direction des forces qui se transmettent d'un disque à l'autre. Ces disques au contact d'une paroi sont maintenant poussés contre elle par des forces d'intensité et de direction distribuées au hasard : les différences entre les forces exercées sur les parois par les disques diminuent ainsi que les différences liées à la configuration des parois.

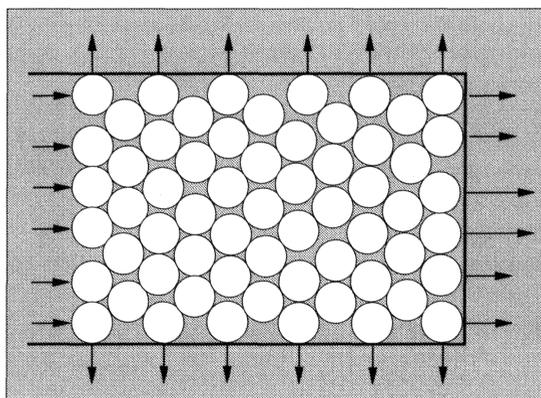


Figure 8 : **Disques disposés de façon désordonnée**

Le fait qu'une augmentation du nombre de disques conduit à des situations de plus grand désordre est mis en évidence, concrètement, en utilisant une poignée de plombs de chasse disposés de façon à couvrir complètement une surface, bornée par des parois aux contours rectangulaires.

La figure 9a montre la photo d'une épreuve effectuée avec environ 2500 billes de plomb.

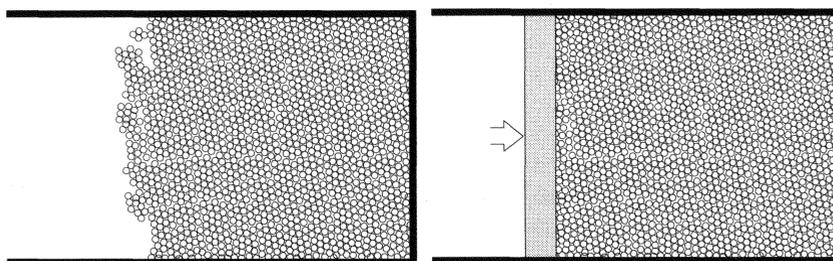


Figure 9a

Figure 9b

Figure 9 : **a) Modèle avec un nombre élevé de billes de plomb**
b) Les billes sont comprimées par un piston

En travaillant directement avec ce modèle concret, il est facile de remarquer qu'il est pratiquement impossible d'ordonner les billes de plomb de façon à ce qu'autour de chacune d'elles la disposition des voisines soit exactement la même.

Dans cette situation, pour comprimer le système, il faut utiliser une paroi mobile qui fonctionne comme un piston, comme le montre la figure 9b.

Pour que la configuration reste pleine il est nécessaire de pousser les billes avec un plan rigide parallèle à celui sur lequel elles sont disposées, de façon à former une seule couche.

Il faut faire réfléchir les étudiants sur le fait que, dans le cas d'un grand nombre de billes, les forces sont toujours perpendiculaires aux parois puisque la situation géométrique de chaque bille à l'égard de la paroi ne change pas par rapport aux situations déjà considérées. Au contraire, la variation d'intensité de ces forces de bille à bille devient inappréciable et ne dépend pas de l'orientation des parois, puisque la présence d'un grand nombre de billes dans des configurations désordonnées élimine chaque «mémoire» de la direction selon laquelle les forces extérieures agissent.

La présentation de l'échantillon avec un nombre élevé de billes s'accompagne d'animations présentant des nombres de billes toujours croissants, animations conçues pour mettre en évidence le fait que, en maintenant constante la force qui agit sur le piston fermant le récipient, la distribution des intensités des forces qui agissent sur les autres parois se rapproche de l'uniformité avec l'augmentation du nombre de billes et du désordre de leur configuration.

À ce stade, la représentation du comportement d'un liquide par le modèle peut être formalisée en introduisant le concept de pression, autant comme paramètre relatif à l'action du liquide sur les parois que comme grandeur caractéristique de l'intérieur du liquide.

C'est pourquoi l'étudiant est invité à considérer la force qui agit sur des surfaces de même dimension en diverses zones sur les différentes parois. L'animation met en évidence, de façon cohérente avec le modèle proposé, que l'intensité de cette force est indépendante de l'orientation de la surface considérée (figure 10).

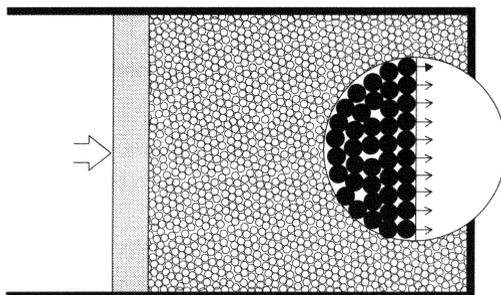


Figure 10 : **Uniformité de l'intensité des forces sur des portions égales de parois différentes**

Ce résultat devrait suggérer qu'on a atteint l'uniformité dans la façon dont le liquide pousse sur les parois ; nous considérons que c'est le moment de proposer la définition de la pression comme rapport entre l'intensité de la force que le liquide exerce sur une certaine surface et l'extension de cette surface.

L'articulation des diverses animations prévoit la possibilité de passer de la situation relative aux parois à celle relative aux zones intérieures du liquide. On fait observer d'abord que les billes en contact avec la paroi poussent sur celle-ci (figure 11a), parce qu'elles-mêmes sont poussées par la couche constituée par les billes immédiatement voisines (figure 11b) et ainsi de suite pour les couches suivantes. Quand il y a désordre, les couches ne sont pas rectilignes, mais peuvent être encore définies comme on le voit à la figure 9. Il est donc naturel de penser que, sur une surface à l'intérieur du liquide, parallèle à une zone de paroi et de même dimension (figure 11c), une force égale à celle exercée sur la zone correspondante de paroi est exercée par les billes les plus internes (les billes des couches comprises entre cette surface et la paroi transmettent à cette dernière les forces qui viennent des billes plus internes).

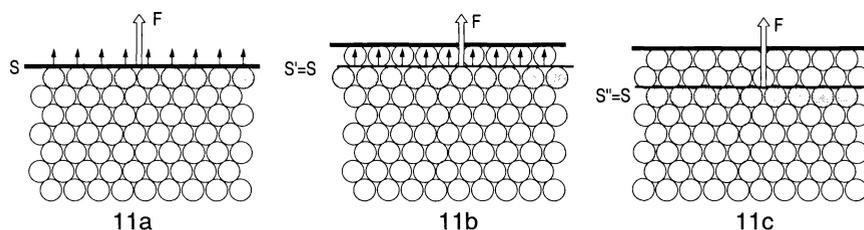


Figure 11 : Forces qui agissent sur des couches de plus en plus internes

Le rapport entre l'intensité de cette force et la dimension de la surface considérée est égal à la pression exercée sur la paroi. En réalité, les billes au contact de la paroi peuvent pousser dessus du fait que la paroi même (grâce à sa rigidité) exerce des forces de réaction de même intensité et de sens opposé.

Chaque couche de sphères peut donc être considérée en équilibre sous l'action de forces opposées et de même intensité exercées par les couches contiguës : on détermine ainsi un état de compression dont la pression dans le liquide est le paramètre descriptif (cela vaut quelle que soit l'orientation de la couche considérée à l'intérieur du liquide (figure 12).

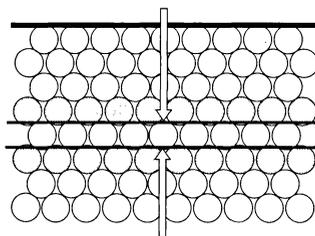


Figure 12 : L'état de compression d'une couche

En ce qui concerne la valeur de ce paramètre, il peut être déterminé comme le rapport entre l'intensité de la force qui agit sur un seul côté de la couche et la dimension de sa surface. Il a donc la même valeur que la pression sur la paroi. Dans ce dernier cas, tout en étant un paramètre caractéristique de chaque point du liquide, la pression peut être déterminée si l'on connaît les actions extérieures et la dimension des surfaces sur lesquelles elles sont appliquées. Cela est vrai pour le domaine des phénoménologies qui se réfèrent au seul principe de Pascal : dans ce domaine la pression est la même en chaque point du liquide.

CONCLUSION

Notre modèle rend compte des phénoménologies strictement hydrostatiques d'un liquide, c'est-à-dire concernant les propriétés des molécules considérées comme des objets rigides capables seulement de se repousser. Dans ce domaine, ce modèle peut être proposé comme un instrument utile pour aider les étudiants à dépasser leurs difficultés dans la compréhension du principe de Pascal, difficultés mises en évidence par de nombreuses recherches. Ces difficultés, à notre avis, proviennent du fait que les étudiants ne réussissent pas à se faire une idée correcte de la distribution des forces à l'intérieur d'un liquide, et donc à fonder la définition de la pression sur une représentation adéquate.

La manière de traiter ce sujet dans les manuels de l'école secondaire, sur ce point ainsi que sur le choix des situations expérimentales, laisse souvent à désirer (Kariotoglou & al., 1990 ; Matthews, 1992). Par exemple, dans de nombreux manuels, l'observation de deux seringues reliées par un tuyau plein d'eau de telle façon qu'en appuyant sur une seringue on éjecte le piston de l'autre, est utilisée pour montrer la possibilité de transmettre des forces à distance avec la compression d'un liquide. Cette expérience, tout en se plaçant dans le contexte du principe de Pascal, et donc dans une logique de distribution des forces transmises par le liquide dans toutes les directions, suggère en réalité l'idée d'une transmission dans une seule

direction (le long du tuyau) ; elle ne contribue donc pas à développer l'idée d'isotropie. Cette expérience comme point de repère peut aller jusqu'à favoriser des représentations mentales en contradiction avec le principe de Pascal.

Le modèle que nous proposons peut pallier partiellement à cet inconvénient en montrant, même dans des situations où la géométrie du récipient privilégie une direction (comme par exemple la figure 5), que les forces qui agissent entre deux disques et contre les parois n'ont pas de directions privilégiées. Par exemple, pour retrouver le comportement mis en évidence par le modèle, les expériences avec les seringues citées ci-dessus pourraient être enrichies en insérant, dans le tuyau de liaison entre les seringues, un morceau de tuyau en caoutchouc extensible qui, en s'élargissant lors de la mise en compression du système, visualise les poussées latérales du liquide sur les parois.

Un autre aspect du comportement des liquides qui ne reçoit pas assez d'attention dans les manuels, et qui au contraire dans notre modèle est introduit dès ses phases initiales, est la corrélation entre la fluidité d'un liquide et sa capacité d'entrer dans un état de compression uniforme du fait de la présence des parois (par exemple, les disques B et C du modèle présenté à la figure 1 suggèrent le comportement d'un fluide, dans le cas où, comme dans la figure 2, ils sont en interaction avec les parois et entrent dans un état de compression).

Même si elle n'a pas été décrite ici, l'activité expérimentale est une partie fondamentale de notre proposition didactique globale. De cette activité, on peut tirer à la fois une confirmation de la validité du modèle et des indications sur ses limites.

Comme n'importe quel modèle, que ce soit avec les billes, ou avec les disques rigides avec contact sans frottement, il a des limites de validité bien précises. Il ne rend compte que des propriétés des molécules comme objets rigides capables seulement de se repousser. Par exemple, les caractéristiques de compressibilité et la propagation d'ondes élastiques dans un liquide sont en dehors du domaine d'application du modèle présenté ; il pourrait être affiné en remplaçant les disques et les billes rigides par des disques et billes, par exemple, en caoutchouc lisse ou mieux avec des anneaux flexibles (des anneaux élastiques pourraient faire penser à la prépondérance du vide dans la matière, même celle condensée).

Ce modèle ne peut rendre compte de propriétés du liquide qui dépendent d'autres caractéristiques et d'autres types d'interaction entre les molécules. Par exemple, les interactions attractives entre les molécules, qui font naître en surface les phénomènes liés à la tension superficielle, sont en dehors des possibilités représentatives du modèle ; dans ce cas, il faudrait utiliser un modèle complètement différent.

Un autre exemple de la limite de validité du modèle décrit est le fait qu'il ne prévoit pas l'agitation thermique des molécules, et donc ne peut expliquer des phénomènes comme la diffusion, le mouvement brownien, l'évaporation, la solidification...

Ces limites et les propositions qui peuvent se développer pour étendre l'interprétation à des phénoménologies différentes de celles de l'hydrostatique sont systématiquement traitées dans d'autres parties de notre proposition hypertextuelle (toujours dans le domaine «Faut-il plus de physique ?») : l'accès à ces parties se fait par mots-clés («boutons») qui permettent d'avoir accès à des parties de l'hypertexte dont le contenu correspond aux mots-clés.

Par exemple, les mots-clés comme «solide» ou «gaz» permettent d'avoir accès à des parties où est mis en évidence comment le modèle doit être modifié pour rendre compte du comportement des systèmes considérés : en particulier pour le gaz, le modèle doit subir une modification fondamentale pour rendre compte de l'aspect dynamique de la pression comme transfert de quantité de mouvement. La possibilité de confrontation entre les propriétés des différents états d'agrégation peut être d'une remarquable efficacité didactique, comme ceci est suggéré dans la littérature (Arons, 1995).

Une caractéristique significative du modèle (et de ses modifications) est qu'il est présenté à la fois de manière concrète et au moyen de simulations. La première forme vise à proposer à l'étudiant, d'une façon simplifiée et dans un contexte familier, le phénomène en cours d'étude. La deuxième est conçue pour accompagner le modèle lui-même avec les éléments formels qui n'appartiennent pas directement au cadre perceptif des grandeurs physiques en jeu, par exemple la représentation, avec les vecteurs, des forces qui s'exercent au sein du liquide et sur les parois qui le contiennent. La première forme vise à suggérer des interprétations qualitatives. La deuxième forme visant à favoriser l'acquisition de moyens de représentations spécifiques du langage scientifique, permet d'avoir accès au niveau de la formalisation.

BIBLIOGRAPHIE

- BISI C. & MASCHERETTI P. (1988). *Natura*. Bergamo, Minerva Italica.
- BORGHI L., DE AMBROSIS A., FALOMO L. & MASCHERETTI P. (1993). Environments multimédias pour l'étude de la physique. *Didaskalia*, n° 2, pp. 40-59.
- DE BERG K.C. (1992). Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air : the semi-quantitative context. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 295-303.
- ENGEL-CLOUGH E. & DRIVER R. (1985). What do children understand about pressure in fluids. *Journal of Research in Technological Education*, vol. 3, n° 2, pp. 133-143.

- KARIOTOGLOU P., KOUMARAS P. & PSILLOS D. (1993). A constructivist approach for teaching fluid phenomena. *Physics Education*, n° 28, pp. 164-169.
- MATTHEWS M. (1992). Teaching about air pressure : a role for history and philosophy in science teaching. In S. Hills (Ed.), *The history and philosophy of science in science education, vol. II*. Kingston-Ontario, Queen's University, pp. 121-133.
- ROLLNICK M. & RUTHERFORD M. (1990). African primary school teachers - what ideas do they hold on air and air pressure ? *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 1, pp. 101-113.
- ROLLNICK M. & RUTHERFORD M. (1993). The use of a conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconception on air pressure. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 4, pp. 363-381.
- RUGGIERO S., CARTELLI A., DUPRÉ F. & VICENTINI M. (1985). Weight, gravity and air pressure : Mental representations by Italian middle school pupils. *European Journal of Science Education*, vol. 2, pp. 181-194.
- 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*, vol. 2, pp. 299-309.

Remerciements

Les auteurs remercient Andrée Tiberghien pour ses commentaires et la révision du texte de cet article.