

Environnements multimédias pour l'étude de la physique

**L. BORGHI, A. DE AMBROSIS,
L. FALOMO, P. MASCHERETTI**

Departement de Physique "A. Volta"
Via Bassi 6
27100 Pavie, Italie.

Résumé

Dans cet article, nous présentons une proposition didactique fondée sur l'utilisation de simulations reconstruisant des expériences originelles particulièrement importantes dans l'histoire de la physique.

Nous avons choisi des simulations relatives à des concepts fondamentaux de la statique des fluides, les expériences de Boyle sur la compression et la dilatation de l'air. Les simulations ont été insérées dans un contexte multimédia et hypertextuel réalisé afin de satisfaire aux exigences survenues au cours des essais successifs avec des étudiants de 17-20 ans.

Mots clefs : *physique, histoire, expériences, simulations, hypertexte.*

Abstract

A teaching experience based on computer simulations of historical physics experiments is presented. In particular, Boyle's experiments with gases on the compression and expansion of air have been selected for their emphasis on the fundamental concepts of hydrostatics. Attention is drawn on the envi-

ronment we tried to create by inserting computer simulations in a multimedia approach. Testing our material with students from 17 to 20 years we have modified the initial strategy and decided to prepare a hypertext which is briefly illustrated.

Key words : *Physics, history, experiments, simulation, hypertext.*

INTRODUCTION

Au cours du travail de recherche effectué à Pavie sur l'utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement de la physique, nous avons conçu et expérimenté des stratégies didactiques pour lesquelles les simulations d'expériences de physique visent à permettre aux étudiants d'établir des liens entre l'observation d'un phénomène et sa description formelle. En général les résultats obtenus avec des étudiants d'âges différents (élèves de cours moyens, étudiants à l'université, futurs enseignants), ainsi qu'avec des enseignants en activité ont été plus que satisfaisants (Borghi & al., 1987, 1989, 1990). Nous avons en particulier mis en évidence comment les analyses de situations expérimentales observées par l'intermédiaire de simulations aident les étudiants à s'approprier les variables significatives du phénomène étudié et à établir entre elles des relations.

Dans cette perspective, nous avons conçu des simulations d'expériences historiques originelles. Habituellement, dans l'enseignement, l'évolution et les motivations conceptuelles de ces expériences ne sont en général pas prises en compte, le résultat final seul étant un objet d'étude sous forme de formule. L'idée de base est de réaliser un environnement didactique dans lequel, à travers la reconstruction d'expériences originelles, l'étudiant peut examiner le développement, même partiel, d'une théorie physique. L'élément central d'un tel environnement est une expérience simulée reproduisant les caractéristiques fondamentales de l'expérience originelle.

L'étudiant travaille ainsi dans une situation proche de la situation expérimentale, en ce qui concerne le projet et l'exécution des mesures. Il est amené à mettre en jeu sa capacité à choisir les grandeurs à mesurer, en relation soit avec les lois à établir, soit avec les limites et caractéristiques de l'appareil expérimental.

Nous supposons qu'une activité de ce type devrait permettre à l'étudiant de mobiliser ses connaissances tant sur le plan conceptuel que sur celui de ses capacités opératoires. En effet, la compréhension de l'expérience historique nécessite que l'étudiant prenne conscience et se positionne sur la théorie sous-jacente ; aussi, l'accent sera mis sur des problèmes qui peuvent, aujourd'hui encore, se poser sur ce sujet aux étudiants.

LES PROPOSITIONS DIDACTIQUES

1. Les simulations

Nous sommes partis de l'hypothèse que, du point de vue de l'apprentissage, l'efficacité des expériences de laboratoire à caractère historique peut être renforcée par des simulations avec ordinateur. L'utilité des expériences historiques a été mise en évidence à travers de nombreuses recherches (Bevilacqua & Kennedy, 1983). Nous avons ainsi réalisé une première proposition didactique concernant les expériences de Galilée avec le plan incliné (Bevilacqua & al., 1990). Cette proposition est constituée de simulations, de suggestions ainsi que d'un guide contenant également des extraits de mémoires originaux.

Cette simulation a été expérimentée avec des étudiants de première année de physique de l'université de Pavie (soit 189 étudiants). Au cours de l'expérimentation, nous avons pu souvent observer les étudiants s'apercevoir avec surprise que leurs connaissances sur le mouvement ne leur permettent pas d'effectuer correctement les expériences apparemment simples qui sont proposées. Dans de nombreux cas, ils prennent conscience que des concepts qu'ils pensaient acquis et parfaitement opérationnels dans tous les contextes, ne l'étaient pas en réalité, du fait qu'ils cachaient des "profondeurs" et des "facettes" insoupçonnables. De même, des simulations des expériences de Boyle sur l'élasticité ont été expérimentées avec 57 étudiants de première année de physique.

Nous avons pu constater avec ces deux essais que l'intérêt des étudiants pour les approfondissements historiques se fait d'autant plus vif que l'exécution des simulations provoque un changement de leur façon de voir. D'autre part, l'utilisation des simulations amène à comprendre les concepts généraux en illustrant leurs valeurs et caractéristiques de manière historique. Pour cela, il paraît opportun d'élaborer une stratégie à partir de laquelle le caractère historique de l'expérience simulée et son exécution effective sont mises étroitement en interaction.

2. Approche multimédia

Les instruments multimédia peuvent offrir cette opportunité. Nous avons donc cherché à mettre à la disposition de l'étudiant un environnement d'étude (micromonde) centré sur des expériences historiques. Nous avons également resitué celles-ci dans leur contexte grâce à des images évoquant les conditions expérimentales originelles, et des messages acoustiques les commentant.

Les différents types de messages reçus par l'étudiant sont indiqués sur la figure 1.

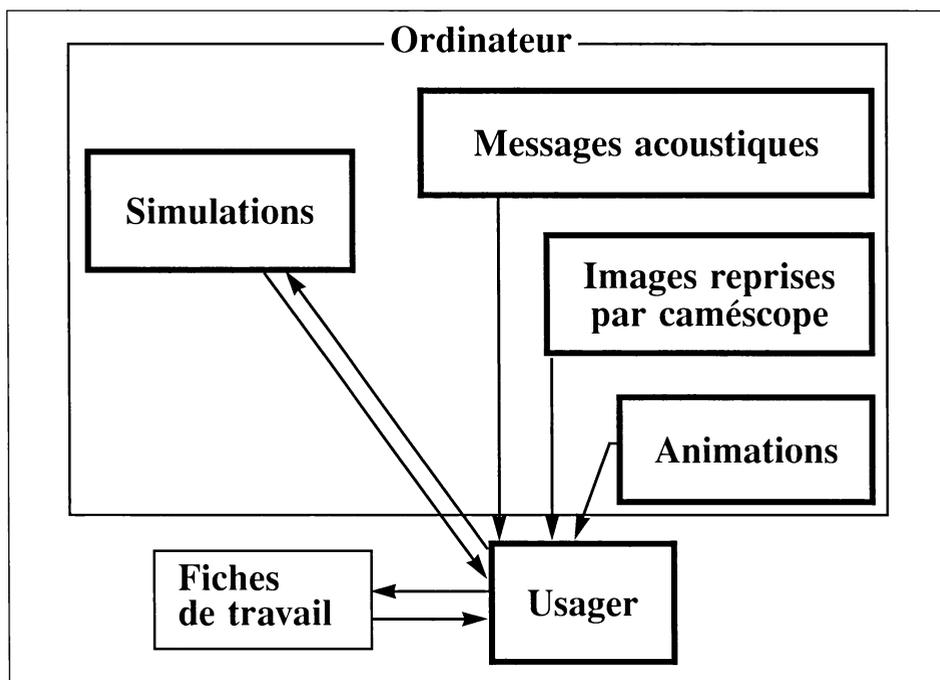


Figure 1

Nous avons fait le choix de permettre à l'étudiant de "reparcourir" un chemin analogue à celui suivi par les chercheurs. Ainsi, l'environnement comporte à la fois des messages acoustiques, des messages visuels divers et des images reprises par caméscope puis digitalisées. Les messages acoustiques ont pour objectif de réduire au minimum la consultation des informations écrites. En effet, ce type d'activité détourne l'attention des étudiants des phénomènes simulés et donc interrompt l'observation. Les images numérisées présentent les dispositifs originaux et créent une liaison entre les instruments et leur représentation schématique dans les simulations. Cette liaison peut aider l'étudiant à reconnaître dans les simulations ce qui est essentiel pour la compréhension de la physique.

En développant ce matériel, nous avons cherché plus particulièrement à :

- mettre en évidence les conditions dans lesquelles les recherches historiques ont été réalisées ;
- suggérer comment la technologie influence le projet d'expériences scientifiques ;
- mettre en relief comment la créativité peut permettre de dépasser les limites de la technologie.

Les expériences de Boyle

Cette approche multimédia a été utilisée soit pour reposer les expériences de Galilée avec le plan incliné, soit pour reconstruire les expériences de Boyle sur la dilatation et la compression de l'air (ces expériences sont décrites dans l'appendice de l'édition de 1662 de *New Physicomechanical experiments*). Les considérations qui suivent réfèrent à la proposition didactique basée sur les recherches de Boyle. Des propositions similaires ont été décrites à partir des recherches de Galilée (Borghi, 1991).

Parmi les travaux de Boyle, nous avons choisi les expériences relatives à la pression de l'air. Celles-ci nous ont semblé être un bon point de départ pour une réflexion sur les phénomènes liés à la pression.

Les problèmes de compréhension de ces phénomènes, moins étudiés que d'autres domaines de la physique, ont été mis en évidence dans plusieurs recherches (Séré, 1982 ; Engel & Driver, 1985 ; Ruggiero & al, 1985).

Les travaux de Boyle sur l'air occupent une place centrale dans l'histoire des sciences quant à la compréhension des phénomènes relatifs aux gaz. Ces travaux, où confluent les résultats et le débat relatif aux expériences de Torricelli, de Pascal et de Hooke constituent une étape décisive pour le développement de la théorie avec l'introduction d'un modèle rudimentaire de l'air. En fait, pour Boyle, l'air se comporte comme un corps élastique. A partir de ce modèle, il explique le comportement observé de l'air et propose des expériences portant sur une relation quantitative entre pression et volume.

Nous avons accordé une attention toute particulière aux problèmes de compréhension des étudiants des cours moyens supérieurs et de première année d'université. Ces problèmes se sont également posés dans le processus historique qui a conduit à la reconnaissance et la détermination de la pression atmosphérique ainsi qu'à la loi de Boyle au XVII^e siècle (Matthews, 1992). Lorsque les étudiants travaillent avec des simulations, de tels problèmes émergent avec clarté. Nous avons vu en effet que ce type de travail mène à une réflexion sur les concepts de base : poids de l'air, pression atmosphérique, transmission et équilibre des forces.

L'environnement et son utilisation par les étudiants

La première expérience de Boyle est d'abord représentée par un dessin évoquant l'environnement de l'expérience (figure 2a). Elle permet à l'étudiant de se faire une idée des conditions réelles de travail. Un commentaire sonore et une animation (figure 2b) conduisent l'étudiant à utiliser la simulation de façon à exécuter directement des "mesures".

En fait, la simulation propose fidèlement les différentes phases de l'expérience de Boyle : l'étudiant peut "ajouter" de façon progressive le mercure

dans la branche ouverte du tube en U et noter la hauteur de la colonne d'air dans la branche fermée. Cette hauteur est en correspondance avec la dénivellation entre les deux surfaces de mercure. Pour évaluer de façon correcte la pression (en prenant en compte la pression atmosphérique), nous devons ajouter à la dénivellation de mercure, la hauteur du mercure dans le baromètre de Torricelli, représentée sur l'écran.

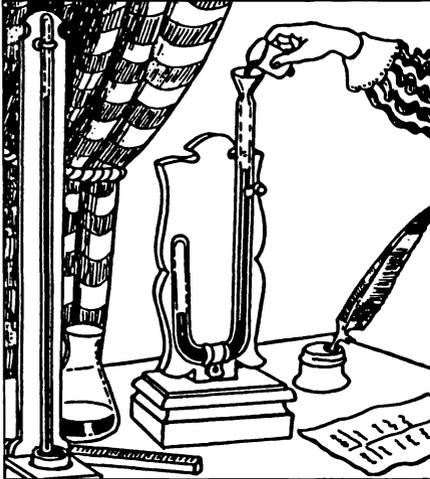


Figure 2a

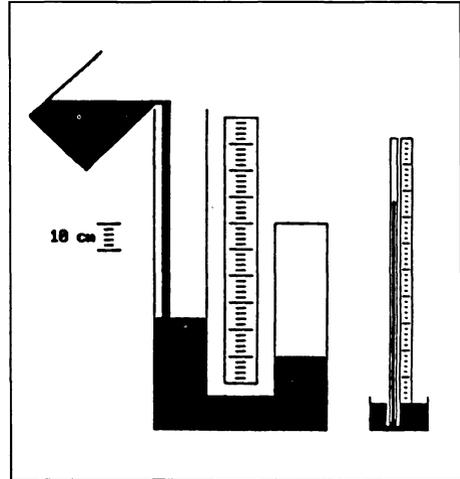


Figure 2b

Représentation de la situation expérimentale (2a) et schéma utilisé pour l'animation (2b) de la première expérience de Boyle.

Il s'agit certainement d'un point délicat dans l'exécution de l'expérience, du fait que nous devons supposer que l'étudiant a une idée claire sur la raison de la dénivellation du mercure entre les deux branches. La surface du mercure dans la branche fermée est soumise à la pression de l'air emprisonné, la surface du mercure dans la branche ouverte est soumise à la pression atmosphérique. La dénivellation du mercure fournit donc une indication sur la différence de pression entre l'air emprisonné et l'air libre. La pression de l'air emprisonné est la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique mesurée par la dénivellation du mercure.

Comme résultat de son travail, l'étudiant peut mettre en relation, à l'instar de Boyle, la variation de la hauteur de la colonne d'air emprisonné avec la variation de la dénivellation du mercure dans les deux branches. Il pourra ainsi établir une relation entre pression et volume.

A la première expérimentation de ce type, 70 % des étudiants de première année de physique travaillant avec cette simulation ne prennent pas en compte la pression atmosphérique (ce résultat a été confirmé par celui d'un questionnaire dans lequel une situation analogue était reproduite : 10 étudiants sur 57 ont fourni des réponses correctes). La présence visible d'un tube de

Toricelli à côté du tube en U dans toutes les images illustrant l'expérience n'est pas suffisante pour attirer l'attention des étudiants sur l'importance de la pression atmosphérique. C'est seulement après avoir effectué une série de mesures et constaté que les paramètres utilisés ne permettent pas d'établir la loi de Boyle qu'ils reconnaissent avoir négligé la pression atmosphérique. Nous noterons à ce sujet que Boyle lui-même, lors de l'exécution de l'expérience, pensa nécessaire de vérifier les "effets de la pression de l'air" sur la dénivellation du mercure entre les deux branches, ce qui révèle que ce fait n'était pas encore totalement admis par la communauté scientifique de l'époque.

D'autres éléments émergeant de cette expérimentation sont les difficultés liées à la description et donc à la compréhension des phénomènes se produisant dans le tube de mercure. Face à ces difficultés, les étudiants ont recours à des formules qui font souvent obstacle à leur analyse. Par exemple, nombreux sont les étudiants qui se souviennent, puis font usage de la formule $PV = \text{constante}$. Cependant, l'expérience ne permettant d'obtenir des indications sur la pression et le volume qu'à partir des seules mesures de hauteurs, ces étudiants se trouvent en difficulté. Au cours de leur travail, ils se posent des questions du type : comment peut-on évaluer la pression sans connaître le diamètre du tube ? Quelle unité de mesure va permettre de l'exprimer ?

La deuxième expérience de Boyle suscite de plus vives discussions. Il s'agit ici d'étudier "l'élasticité active" de l'air, c'est-à-dire la propriété qu'il possède de se détendre à la manière d'un ressort lorsque les forces qui le compriment diminuent.

La simulation propose, à nouveau, à l'étudiant la situation expérimentale conçue par Boyle. Dans un grand récipient rempli de mercure, un tube plus fin, fermé au sommet de façon à emprisonner une certaine quantité d'air, est partiellement immergé (figure 3).

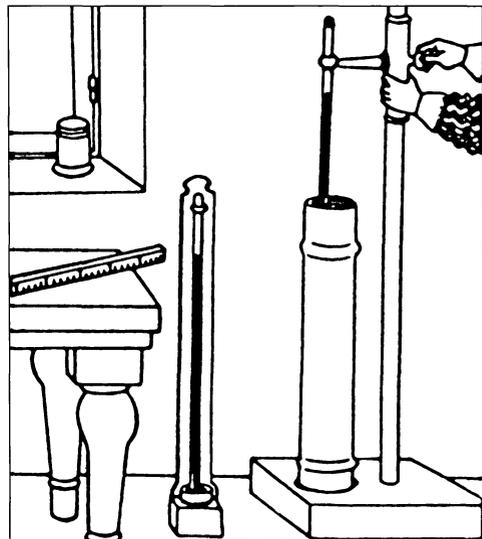


Figure 3
Représentation de la deuxième
expérience de Boyle.

En soulevant le tube intérieur, la pression de l'air emprisonné diminue par rapport à la pression atmosphérique. Cette diminution peut être évaluée par la mesure de la dénivellation entre les surfaces libres du mercure à l'intérieur et à l'extérieur du tube fin. Pour chaque position du tube intérieur, Boyle mesurait la hauteur h_a de la petite colonne d'air emprisonné et la valeur Δh de la dénivellation (figure 4) ; h_T est la hauteur de la colonne du baromètre mesurant la pression atmosphérique et Δh est la pression hydrostatique. La pression de l'air emprisonné est donc donnée par $(h_T - \Delta h)$. L'étudiant travaillant avec la simulation peut, comme lors du premier essai, reporter dans un tableau les valeurs de Δh , h_a et h_T . En utilisant une fiche de travail conçue à cet effet, il lui est possible d'aboutir à la relation $(h_T - \Delta h) h_a = \text{constante}$, et donc de constater que la relation entre pression et volume $PV = \text{constante}$ est également valable.

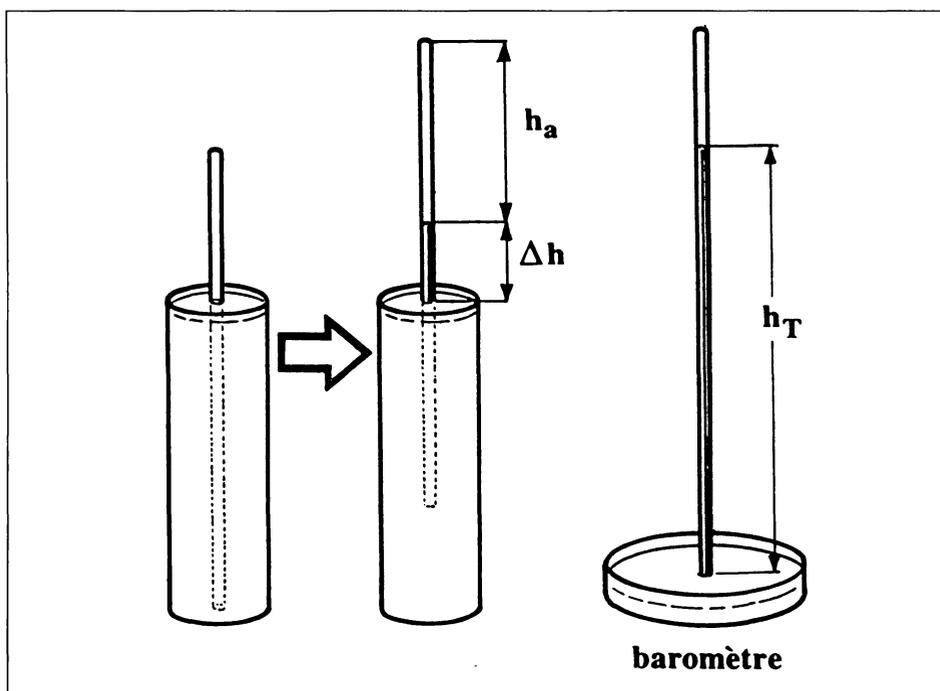


Figure 4

Les étudiants ont éprouvé une difficulté particulière à analyser cette situation d'équilibre entre les forces extérieures et la force due à la pression de l'air emprisonné. Le modèle de l'air en tant que corps "élastique" introduit par Boyle peut être d'un grand secours dans ce cas puisqu'il ramène le problème à un équilibre de forces.

Il est important de noter que le terme "d'élasticité" de l'air n'a pas une signification analogue à celle de l'élasticité d'un ressort (en fait, la relation entre la pression et le volume n'est pas linéaire contrairement à celle existant entre la force et la déformation du ressort). Pour Boyle, le terme "élastique" indiquait le fait que l'air, "*comme les autres ressorts est plus fort quand il est déformé par un poids plus grand*", mais il n'impliquait pas encore une relation précise entre force et variation de longueur.

3. Hypertexte

L'environnement didactique créé avec l'approche multimédia est apparu plus riche et plus stimulant que l'environnement initial basé principalement sur les simulations. Il présente cependant dans son utilisation des caractéristiques de séquences linéaires qui conditionnent le choix de l'étudiant pendant son travail. Pour cette raison, nous avons choisi de réaliser une proposition didactique hypertextuelle sur le comportement des gaz, afin de permettre des parcours plus articulés et diversifiés.

Cet hypertexte (en cours de réalisation) a été projeté pour recueillir et utiliser de manière efficace les points qui proviennent du travail sur des expériences originelles. L'utilisation des simulations soulève des problèmes et des questions auxquels nous répondons par des interventions externes (discussions collectives ou en petits groupes, lecture du guide, conseils de lectures ultérieures) ; avec l'hypertexte, il est permis à l'étudiant (ou l'enseignant) de développer sa recherche de façon autonome. Celui-ci offre la possibilité de puiser peu à peu les informations nécessaires à l'étude. Nous avons pour cela cherché à réaliser une proposition didactique permettant de donner les informations utiles à l'étudiant pour la compréhension des phénomènes relatifs aux gaz, sans pour autant le forcer à prendre une direction précise.

La figure 5 représente une image vidéo de l'hypertexte qui peut être utilisée par l'utilisateur pour changer l'orientation de la "navigation".

Selon la logique de l'hypertexte, les différentes zones indiquées sur la figure sont les aires auxquelles l'utilisateur peut directement accéder sans obstacle de parcours. Nous avons cependant choisi de présenter initialement les relations entre ces aires à travers l'image d'un arbre, afin de suggérer un parcours que nous jugeons efficace d'un point de vue didactique pour l'utilisation de l'hypertexte.

Comme le montre cette figure, le contenu des aires est de trois types : essais originaux, ressources, approfondissements historiques.

Dans la présentation, l'utilisateur est informé du travail de Boyle, travail ensuite repris selon des modalités "expérimentales" dans l'aire des simulations : ces dernières permettent la répétition des expériences qui ont conduit à la loi de Boyle.

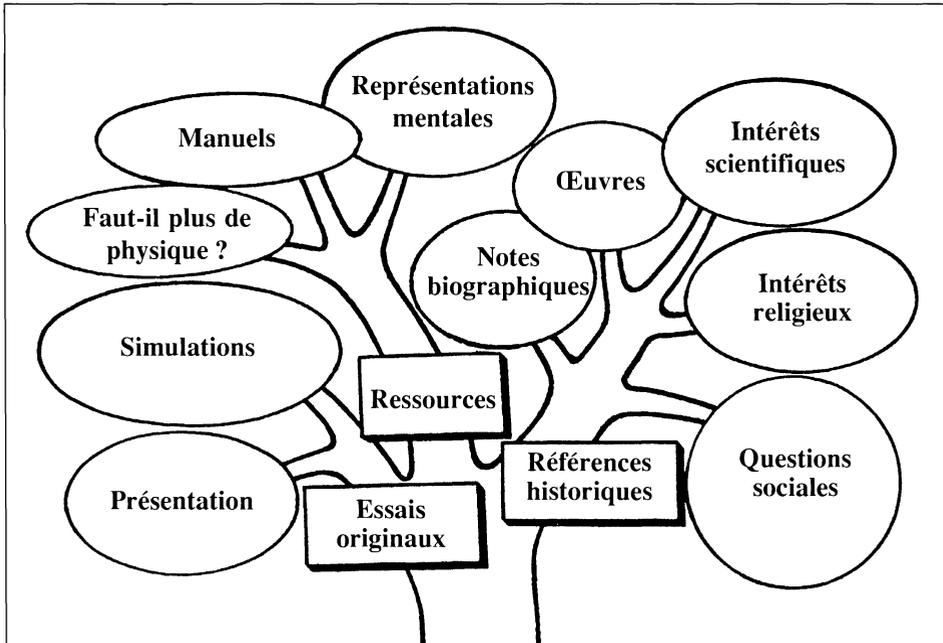


Figure 5 : Page vidéo de référence représentant les aires de l'hypertexte.

Nous tenons comme particulièrement significative la section intitulée "Faut-il plus de physique ?". Cette section contient des informations sur les concepts de base et sur la réalisation d'expériences de laboratoire. Certaines de ces expériences sont réalisables en ayant recours à des données élaborées et récoltées à partir des dispositifs MBL (Thornton, 1990). Les deux autres types de ressources sont conçus comme des instruments de réflexion sur les moyens les plus usuels de présentation de l'argument (manuels) et sur les stratégies cognitives documentées en littérature (représentations mentales).

Les sections concernant les références historiques ont essentiellement pour objectif de mettre en évidence l'importance de situer un travail scientifique dans le contexte historique où il s'est développé. L'hypertexte fournit, en dehors des informations bibliographiques sur le travail de Boyle, d'amples extraits de ses écrits originaux ("Œuvres"). Il présente dans la section "Intérêts scientifiques" une documentation sur les scientifiques qui ont participé avec Boyle à la construction des fondements de la connaissance scientifique moderne. Enfin, la section "Questions sociales" replace les intérêts de Boyle dans un contexte économique et social plus large.

A l'avenir nous avons l'intention d'utiliser l'hypertexte avec des étudiants en première année de physique à l'université et des enseignants d'école primaire, dans le but d'observer dans quelle mesure cet hypertexte peut favoriser un apprentissage autonome chez des personnes de bagages différents.

Par ailleurs, nous projetons de vérifier si l'organisation actuelle de l'hyper-texte est bien adaptée, en ce qui concerne plus particulièrement le contenu de chaque section et la variété des outils (animations, simulations, suggestions d'activités expérimentales) à la disposition des usagers.

BIBLIOGRAPHIE

BEVILACQUA F. & KENNEDY P.J. (Eds) (1983). *Proceedings of international conference on using history of physics in innovatory physics education*. Pavia, Pavia University and ICPE.

BEVILACQUA F., BONERA G. & MASSARA C.I. (1987). *La caduta dei gravi : un'analisi storica*. Ivrea, Olivetti.

BEVILACQUA F., BONERA G., BORGHI L., DE AMBROSIS A. & MASSARA C.I. (1990). Computer simulation and historical experiments. *European Journal of Physics*, Vol. 11, pp. 15-24.

BORGHI L., DE AMBROSIS A., MASCHERETTI P. & MASSARA C.I. (1987). Computer simulation and laboratory work in the teaching of mechanics. *Physics Education*, Vol. 22, pp. 117-121.

BORGHI L., DE AMBROSIS A., GAZZANIGA G., IRONI L., MASCHERETTI P. & MASSARA C.I. (1989). Integrating computer simulations and the physics laboratory : a unit dealing with wave propagation. *Computers and Education*, Vol. 13, n° 2, pp. 179-186.

BORGHI L., DE AMBROSIS A. & MASSARA C.I. (1990). Simulazioni strettamente correlate ad esperienze di laboratorio. *La Fisica nella Scuola*, Vol. XIII, n° 2, pp. 19-25.

BORGHI L. (1992). Computer simulation of historical experiments and understanding of physics concepts. In A. Tiberghien & H. Mandl (Eds), *Intelligent learning environments and knowledge acquisition in physics*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 207-215.

ENGEL 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.

MATTHEWS M. (1992). Teaching about air pressure : a role for history and philosophy in science teaching. In S. Hills (Ed), *Proceedings of the second international conference on the history and philosophy of science and science teaching*. Kingston, Ontario Queen's University, pp. 121-133.

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. 7, n° 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. 4, n° 3, pp. 299-309.

THORNTON R. (1990). Learning Physical Concepts with Real-Time Laboratory Measurement Tools. *American Journal of Physics*, Vol. 58, n° 9, pp. 858-867.