

Table des matières

Résumé	5
1 Introduction	7
1.1 Des activités basées sur l’investigation : pourquoi ?	7
1.2 Complexité vs. authenticité épistémologique	9
1.3 Des laboratoires virtuels pour faciliter la tâche ?	10
1.4 Axes d’analyse du laboratoire virtuel	10
2 Structure des activités et objectifs d’apprentissages	13
2.1 Structure du laboratoire	13
2.2 Objectifs d’apprentissages et compétences visées	14
3 Analyse des activités	17
3.1 Pré-requis	17
3.2 Etayage	18
3.3 Evaluation formative	21
3.4 Authenticité épistémologique	23
4 Conclusions	25
A Article à l’attention des enseignants et élèves	29
Bibliographie	31

Résumé

Le développement des technologies de l'information et de la communication a permis la vision d'une école où l'on puisse effectuer des investigations scientifiques "authentiques" sans la contrainte de matériel coûteux et accessibles depuis n'importe où, conduisant au développement de laboratoires virtuels (notamment en physique des particules et en astronomie, voir plateforme Go-Lab). Ce travail présente un laboratoire virtuel d'investigation de physique des fluides pour des élèves du secondaire 2¹, inspiré par la recherche du groupe "Flash&Splash" de l'EPFL en vols paraboliques, et l'analyse de ce laboratoire par rapport aux apports des sciences de l'éducation et des contenus enseignés à la Haute Ecole Pédagogique du canton de Vaud. Les compétences visées sont tout d'abord déclinées en divers objectifs d'apprentissage selon la taxonomie d'Anderson et al. (2001), révélant une complexité des tâches non seulement par les habiletés cognitives supérieures qu'elles activent, mais aussi par la multiplicité des connaissances mobilisées et la complexité du processus d'investigation. Le problème de la complexité est ensuite abordé du point de vue des sciences cognitives, en particulier le risque de surcharge cognitive et de confusion. Pour limiter ce risque, le laboratoire exige en pré-requis que les élèves aient été introduits aux différents concepts et connaissances procédurales mobilisées, tandis que des dispositifs d'étayage et d'évaluation formative sont incorporés au laboratoire pour guider les élèves vers les objectifs d'apprentissage. Ces différents dispositifs sont analysés en fonction de la gestion de la complexité, de la facilitation d'un apprentissage avec compréhension (connexion et stockage des concepts en vue de les secondariser), de l'implication active de l'apprenant (conscientisation et responsabilisation des apprentissages) et du degré d' "authenticité épistémologique" des activités.

Mots-clés : Enseignement par investigation - Laboratoire virtuel Bulles - Cavitation - Vols paraboliques - Complexité - Compétence - Objectif d'apprentissage - Etayage - Evaluation formative

1. correspondant au gymnase en Suisse ou au lycée en France

1 Introduction

1.1 Des activités basées sur l'investigation : pourquoi ?

Outre le développement de savoirs factuels et conceptuels sur le monde qui nous entoure, l'un des buts génériques de l'éducation en sciences est de développer chez les élèves une manière de raisonner scientifique (Chinn and Malhotra 2002, Zimmerman 2007). Plus précisément, il s'agit d'une série d'outils de raisonnement ou habiletés cognitives qui sont non seulement mobilisées au travers du processus de recherche, mais qui sont nécessaires à la construction de tout savoir scientifique et qui par leur transversalité peuvent se secondariser à des situations d'autres sciences ainsi que tout au long de la vie (Alberts 2009, McConnell et al. 2010). Parmi ces outils on retrouve : la pose d'hypothèse ou de questions de recherche, la planification d'une expérience ou d'une étude, l'analyse de résultats, la discussion de leur validité, le développement de liens entre concepts théoriques, la formulation d'explications alternatives, l'étude comparative d'autres recherches etc (Chinn and Malhotra 2002). Bien qu'il n'y ait pas de consensus quant à la définition d'"enseignement par investigation", il s'agit au sens le plus ouvert d'activités visant à développer au moins l'une des habiletés cognitives ci-dessus tout en impliquant les élèves activement dans la construction des connaissances (Minner et al. 2010, McConnell et al. 2010), en vertu du fait que processus et contenu sont inextricablement liés dans une activité scientifique (Michaels et al. 2007).

Parmi les différentes raisons d'introduire des activités basées sur l'investigation à l'école, les suivantes sont d'intérêt pour l'analyse présentée dans ce mémoire :

1. *Développer des facultés de raisonnement scientifique* (cf. ci-dessus) : car de telles facultés sont nécessaires à la construction de tout savoir scientifique et sont à la base du raisonnement critique, au sens où chaque étape du raisonnement se caractérise par le doute du chercheur, qui est l'une des compétences et attitudes attendues des futurs citoyens du monde (Rotherham and Willingham 2009).
2. *Favoriser un rapport au savoir scientifique épistémologiquement authentique* : pour montrer le "vrai visage" de la science, c.à.d. que celle-ci n'est pas un livre dogmatique de la vérité qui ne se vérifie qu'en salle de classe (via des expériences "asceptisées"), mais un savoir vivant et en évolution qui implique l'analyse de données souvent complexes et des conclusions parfois spéculatives susceptibles d'être révisées.

3. *Développer un concept ou l'explication d'un phénomène par approche constructiviste* : puisque l'apprenant se repose sur ses connaissances existantes pour construire le nouveau concept ou l'explication du phénomène tout en le connectant à sa carte conceptuelle mentale (Bransford et al. 2000).
4. *Impliquer les élèves de manière active et responsable dans la construction du savoir* : les activités d'investigation étant de nature "centrée sur l'élève", elles favorisent la prise en charge consciente et volontaire des apprentissages par l'apprenant tout en l'engageant de manière participative (Minner et al. 2010).
5. *Confronter les élèves à des situations complexes* : Alors que les exercices traditionnels ne touchent souvent qu'à un seul concept et des niveaux de complexité cognitive peu élevés de la taxonomie d'Anderson et al. (2001), les activités d'investigation amènent les élèves à mobiliser plusieurs de leurs connaissances procédurales et conceptuelles et à les intégrer de manière productive pour faire face à un problème plus proche de la réalité (De Ketele and Gerard 2005).
6. *Donner une vision plus réaliste du travail d'un scientifique* : L'école ayant aussi pour but d'orienter les élèves vers de futures carrières, il est juste que de telles activités exemplifient la démarche du travail scientifique. Cette perspective peut également avoir une influence motivatrice sur l'apprenant en lui permettant de s'y projeter. Pour dresser une analogie musicale : n'est-ce pas parce que l'on peut écouter consciemment de la musique jouée par un expert que l'on décide d'entreprendre un apprentissage musical malgré toutes les difficultés ?

Tous les arguments ci-dessus montrent que les activités d'enseignement par investigation mettent l'accent sur le processus¹, sortant du paradigme de l'enseignement "centré sur le résultat et la bonne réponse" et favorisant un rapport au savoir en correspondance. L'élève n'est plus dans un mode automatique d'application de recette, mais dans un mode cognitivement présent et engagé dans la démarche d'accomplissement de la tâche (Morissette 2007, voir aussi point 4 ci-dessus). Enfin, sortant du cadre d'analyse de ce mémoire, je voudrais souligner l'importance peut-être plus importante des valeurs et attitudes que l'investigation peut développer chez les élèves. Le souci de la preuve et de la logique dans l'établissement de ses jugements, la volonté d'explorer des idées nouvelles, le scepticisme face aux préjugés et aux réponses trop simples, sont toutes des attitudes qui permettent la mise en place d'une société plus équitable et humaniste (Alberts 2009). Remarquons aussi que le processus de recherche présente de nombreux parallèles avec le processus créatif (Lubart et al. 2011), qui ne peut se réaliser qu'en dehors du paradigme et de la bonne réponse, sans la crainte de l'erreur, dans un esprit d'exploration et de curiosité.

1. Dans le cas de l'activité 1 et 3 du laboratoire analysé ici, on n'aboutit à aucun résultat numérique concret, mais à des schémas conceptuels et à une discussion.

1.2 Complexité vs. authenticité épistémologique

Outre le fait que les activités d'investigation peuvent être difficiles à implémenter en pratique (matériel requis, temps à disposition), elles présentent des obstacles majeurs auxquels le laboratoire développé dans le cadre de ce mémoire devra faire face : une *complexité du processus* d'investigation (présentant des choix, un cheminement qui peut être cyclique et/ou avec des embranchements, des essais et erreurs, tout en faisant appel à plusieurs habilités cognitives supérieures, cf. Chinn and Malhotra 2002, McConnell et al. 2010), une *complexité par la multiplicité des concepts* mobilisés, et une *surcharge cognitive* de la mémoire de travail en conséquence (voir Croisile 2009, au sujet des différents types de mémoire).

Du à la capacité limitée de traitement d'informations nouvelles par la mémoire de travail, le risque de surcharge cognitive survient *lorsque les élèves sont mis en face de un voir plusieurs concepts inconnus* (à "découvrir") et/ou que les élèves ne sont pas familiers avec la démarche de recherche (Kirschner et al. 2006). Cette surcharge peut mettre en péril l'efficacité de telles activités pour l'atteinte des objectifs d'apprentissages, surtout *lorsque le guidage est minimal* (s'apparentant à un apprentissage "par la découverte", Kirschner et al. 2006). Dans le cas d'un guidage minimal, il y a également un *risque que les élèves perdent le fil de leur recherche*, restent prisonniers de leur concepts spontanés ou conceptions erronées, voire entrent en confusion (ce qui peut conduire à de nouvelles conceptions erronées, cf. Kirschner et al. 2006, Brown and Campione 1994). Dans la même idée, les pédagogies de la découverte qui mettent davantage l'accent sur la recherche d'informations que sur leur organisation en réseau conceptualisé *ne favorisent pas le stockage des nouveaux concepts dans la mémoire à long terme* (Kirschner et al. 2006).

A l'inverse, les expériences traditionnelles de laboratoires et les exercices issus de livres d'apprentissage sont souvent tellement simplifiés qu'ils ne contiennent plus aucun des éléments de raisonnement scientifique mentionnés ci-dessus (voir points 1 et 2 de la Sect. 1.1). Cela a pour conséquence grave de *développer chez les élèves une vision épistémologiquement fautive de la science* comme une suite de causes-effets logiquement démontrables ou vérifiables de manière algorithmique (Chinn and Malhotra 2002). En exagérant un peu, le risque de la sursimplification est de finalement transmettre une image de la recherche scientifique comme résultant de l'application de recettes, tout comme pour la résolution de tâches traditionnelles. L'autre risque de la sursimplification est de ne pas *apprendre aux élèves à faire face à des situations complexes* (voir point 5 de la Sect. 1.1). Or l'un des buts généraux de l'apprentissage est de développer la capacité de secondariser ses connaissances à de nouvelles situations comportant la complexité du réel (Anderson et al. 2001), ce pourquoi la mobilisation de connaissances conceptuelles et procédurales dans le cadre d'une situation complexe est au centre de l'approche par compétence (Mottier Lopez and Laveault 2008, Tardif et al. 2006, De Ketele and Gerard 2005). Par leur complexité intrinsèque, les activités d'investigation "authentiques" s'inscrivent dans cet esprit, requérant que l'apprenant effectue des choix de méthodes, de questions de recherche etc

en intégrant ses connaissances pour penser de manière productive (Bransford et al. 2000).

L'enjeu de l'enseignement basé sur l'investigation est donc de développer des activités *suffisamment étayées pour éviter la surcharge cognitive et faciliter l'encrage des concepts* (voir Sect. 3.2), *tout en conservant une certaine complexité et quelques uns des éléments clés du raisonnement scientifique* (voir Sect. 3.4).

1.3 Des laboratoires virtuels pour faciliter la tâche ?

Les véritables expériences de recherche impliquant du matériel technologique de pointe ainsi qu'une scrupuleuse collecte de données sont évidemment hors de portée des établissements scolaires. Parmi les différents moyens possibles pour conduire un projet de recherche simple mais épistomologiquement authentique dans un cadre scolaire, on notera les technologies de l'information et de la communication (TICs) permettant : l'usage de simulations, l'usage de bases de données récoltées, ou encore le pilotage d'un laboratoire à distance (Chinn and Malhotra 2002). L'usage de simulation présente l'avantage d'éviter de noyer les élèves dans la complexité technique d'une expérience et de les focaliser sur la manipulation de différentes variables physiques et leurs effets, conduisant plus facilement à un raisonnement de type théorique (lien entre ces variables). Cependant, elles sont limitées dans le sens où n'apparaissent dans la simulation que les variables qui ont été préalablement choisies (programmées), donc une grande partie du désordre inhérent au monde réel et à l'expérimentation réelle n'y est pas présente. À l'inverse, les activités utilisant des bases de données donnent l'opportunité aux élèves d'explorer des véritables données scientifiques (avec leurs défauts) et d'en extraire un sens, mais ne donnent pas la liberté aux élèves de récolter eux-mêmes leurs données et d'expérimenter.

Lorsqu'ils sont intégrés dans un support numérique disponible en ligne, les laboratoires virtuels offrent deux autres avantages intéressants : ils sont *accessibles depuis n'importe où*, permettant aux élèves de réaliser ou poursuivre les expériences chez eux, et ils *permettent un certain étayage par la structure ou l'environnement qu'ils utilisent* (Manlove et al. 2007, van Joolingen et al. 2005).

L'approche choisie dans le laboratoire virtuel présenté ici utilise tantôt des simulations (dans l'activité 1), ou une base de données en ligne (activités 2,3, voir Sect. 2.1)

1.4 Axes d'analyse du laboratoire virtuel

Au cours de l'année 2013-2014, j'ai développé pour les raisons suivantes un laboratoire virtuel d'investigation inspiré de la recherche que je poursuis au Laboratoire des Machines Hydrauliques de l'EPFL sur les bulles de cavitation² à bord de vols paraboliques de l'Agence Spatiale Européenne :

2. Voir site web du groupe : <http://bubbles.epfl.ch>

- Le sujet se prête à un laboratoire virtuel car certaines de nos données (films de bulles implosant en apesanteur) sont disponibles en ligne et peuvent être analysées facilement à l'aide d'un logiciel.
- La communauté manque d'activités d'investigation virtuelles en physique des fluides (mis à part des activités simples sur la poussée d'Archimède par exemple), la plupart des activités d'investigation utilisant des TICs étant des activités d'astronomie ou de physique des particules³.
- En s'inspirant de la recherche que j'effectue ainsi que de projets de semestre d'étudiants de l'EPFL, le laboratoire revêt un caractère authentique tout en donnant une idée aux élèves de ce à quoi peut ressembler de tels travaux de recherche.

Ce mémoire présente une auto-analyse critique des activités de ce laboratoire selon les axes suivants :

- Gestion de la complexité : Quels sont les moyens proposés pour éviter que les élèves soient en surcharge cognitive ou perdent le fil ?
- Implication de l'apprenant : Par quel moyen l'apprenant est-il impliqué de manière active dans le déroulement des activités ? Est-il amené à se responsabiliser de manière consciente et volontaire face à ses apprentissages ?
- Capacité de secondarisation : Les activités facilitent-elles un apprentissage avec compréhension (connexion entre les concepts) et une capacité de secondarisation ?
- Authenticité épistémologique : Les activités permettent-elles de travailler et développer des habiletés cognitives du raisonnement scientifique ?

The logo for Clicours.COM is displayed in white text on a blue rectangular background.

3. Voir p.ex. le référentiel en ligne Discover the Cosmos :<http://www.discoverthecosmos.eu/>

2 Structure des activités et objectifs d'apprentissages

2.1 Structure du laboratoire

Le laboratoire virtuel analysé dans ce mémoire est sous la forme d'une présentation (en format Open Office) qui peut être accédée en ligne à l'adresse suivante :

<http://bubbles.epfl.ch/Education>.

Pour le détail du contenu du laboratoire, prière de se référer à cette présentation.

Originellement conçue pour le projet européen de laboratoires virtuels Go-Lab (“Global Online Science Labs for Inquiry Learning at School”) ¹, *cette présentation s'adresse directement à l'apprenant* suivant le ton des laboratoires en ligne de ce projet. Les régulations y sont donc incorporées sous la forme de questions de guidage, de pointage et d'évaluation “formative” (voir Sects. 3.2 et 3.3) pour que l'apprenant puisse réaliser les activités de manière autonome si besoin. Pour une idée de ce à quoi peut ressembler le format des laboratoires virtuels Go-Lab, la première activité de ce laboratoire a été mise au format “Inquiry Learning Space” et se trouve accessible à l'adresse :

<http://graasp.epfl.ch/metawidget/1/6f49c797b0941c05b05b542d6b99d152ff0c2c54>

Ce laboratoire virtuel se compose de trois activités selon la structure indiquée dans la Fig. 2.1. L'activité 1 est introductive et peut être réalisée indépendamment des deux autres, alors que les activités 2 et 3 nécessitent une introduction préalable aux bulles de cavitation (comme l'activité 1) et répondent à des questions de recherches que les élèves sont amenés à formuler à la suite de l'activité 1.

Chacune des trois activités est elle-même structurée en suivant les étapes du cycle d'investigation suggérées par Go-Lab ² et présentées dans la Fig. 2.2. Notons que l'en-tête de chacune des pages de la présentation du laboratoire permet de rappeler à l'apprenant l'étape du cycle d'investigation dans laquelle il se trouve (voir Sect. 3.2).

Finalement, chaque activité se conclut par une phase d’“évaluation formative” (discutée dans la Sect. 3.3) permettant à l'apprenant de se situer par rapport à l'acquisition des objectifs.

1. <http://www.go-lab-project.eu/>

2. Voir “Inquiry learning cycle” : <http://www.go-lab-project.eu/inquiry-learning-cycle>

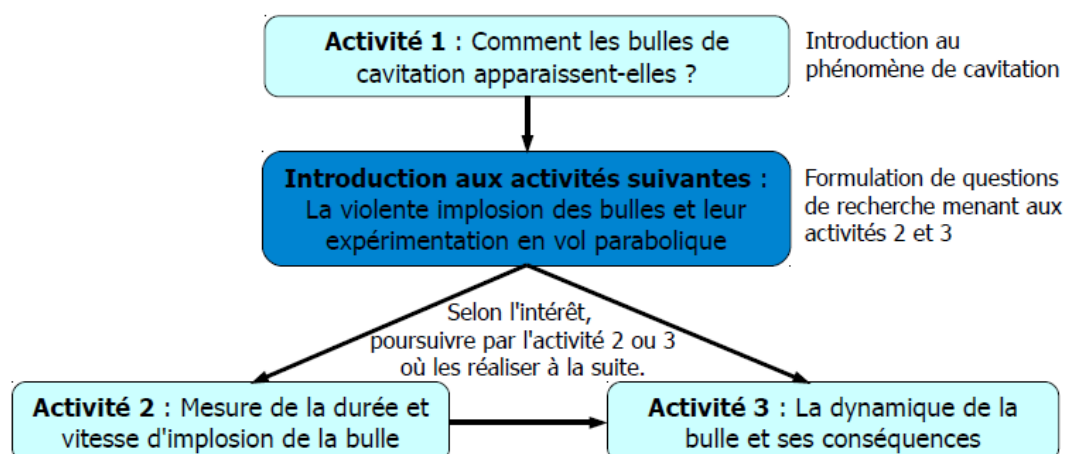


FIGURE 2.1 – Structure du laboratoire virtuel en trois activités.

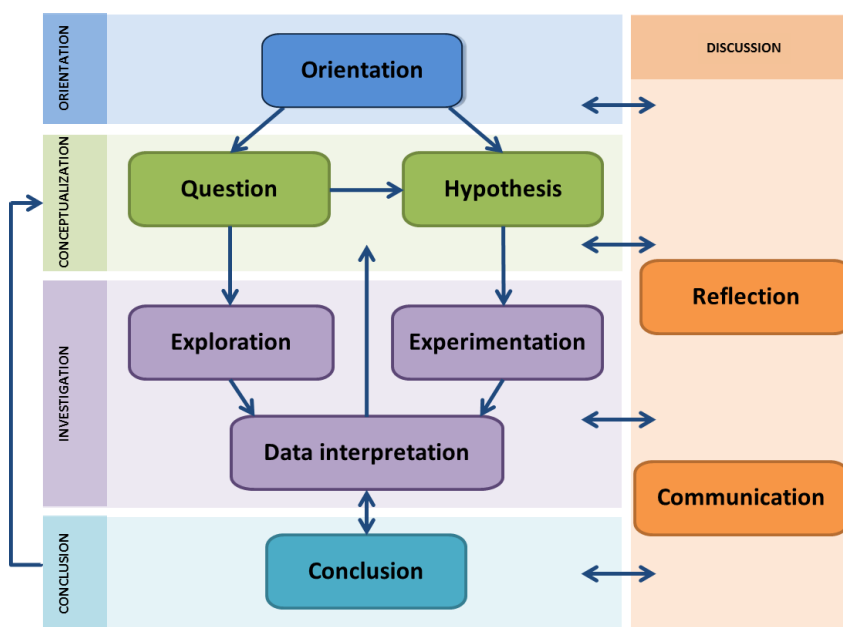


FIGURE 2.2 – Phases du cycle d'investigation tel que définies par le consortium GO-LAB.

2.2 Objectifs d'apprentissages et compétences visées

Voici les compétences générales développées par le laboratoire dans sa globalité :

1. Mener à bien un travail de recherche expérimental depuis la pose de questions de recherche à l'analyse de données et l'utilisation de résultats pour l'élaboration de conclusions.
2. Communiquer de manière cohérente et structurée les étapes de sa recherche : motivations, hypothèse, méthodes, résultats, conclusions.
3. Mobiliser différentes connaissances théoriques et pratiques de manière intégrée pour traiter une situation nouvelle.

4. Synthétiser un phénomène, ses causes et/ou son évolution sous forme diagrammatique en utilisant des graphes légendés ou des schémas.

Puisque les activités du laboratoire parcourent toutes les étapes du cycle d'investigation (voir Fig. 2.2), sauf la planification de l'expérience et la collecte des données (voir Sect. 3.4), elles contribuent ainsi à la compétence 1. La compétence 2, travaillée dans les activités 1 et 3, représente une compétence clé dans l'enseignement des sciences, car rendre compte de sa démarche de recherche permet non seulement de la communiquer à ses pairs mais aussi une auto-synthèse consciente et une vérification de son cheminement (voir aussi Sect. 3.2). Un tel laboratoire d'investigation "authentique" faisant appel à la mobilisation de plusieurs facultés cognitives ainsi que des connaissances procédurales et conceptuelles associées, il développe du même coup la compétence 3. Quant à la compétence 4, travaillée dans l'activité 1 et 3, il s'agit d'un exemple d' "habitude de pensée" très utilisée en sciences (Dufresne et al. 2005), permettant à la fois de synthétiser une explication sous forme visuelle et de renforcer les connections mentales entre les concepts impliqués.

Les quatre compétences ci-dessus se déclinent en 11 objectifs d'apprentissages, classifiés dans le Tableau 2.1 en fonction de l'activité et du niveau de complexité de la taxonomie d'Anderson et al. (2001) :

1. O1 : Expliquer un phénomène (p.ex. l'apparition et l'implosion de bulles de cavitation) en construisant un modèle schématique des relations cause-effets entre les concepts (p.ex. pression, changement de phase et accélération/décélération du liquide). Utiliser ce modèle de manière prédictive (implosion).
2. O2 : Prédire comment varie la pression nécessaire à produire de la cavitation lorsque la température varie en examinant le diagramme de phase.
3. O3 : Dédire de l'augmentation de la vitesse d'implosion ainsi que du rebond de la bulle que son contenu en gaz doit s'échauffer par compression adiabatique.
4. O4 : Générer une hypothèse en combinant observations (films) et théorie connue (diagramme de phase).
5. O5 : Générer des questions de recherche testables, c'est à dire auxquelles on peut apporter des réponses par la mesure.
6. O6 : Prendre des mesures de distance et de durée sur des films numériques (images en pixels).
7. O7 : Implémenter une mesure de la vitesse moyenne d'implosion de la bulle (en faisant la simplification d'une bulle parfaitement sphérique). Implémenter une mesure de l'évolution de la bulle au cours du temps et en produire un graphique $R(t)$.
8. O8 : Interpréter un graphique (ici $R(t)$ et $v(t)$).
9. O9 : Synthétiser sous la forme d'un graphe légendé les différentes étapes de la vie d'une bulle de cavitation ainsi que les transformations d'énergie correspondantes.

TABLE 2.1 – Objectifs d'apprentissages visés dans chacune des activités du laboratoire selon la taxonomie d'Anderson et al. (2001). "Intro" se réfère à la partie d'introduction aux activités 2 et 3 selon la structure de la Fig. 2.1.

Niveau de complexité	Activité 1	Intro	Activité 2	Activité 3
Restituer				
Comprendre	O1,O2			O3
Appliquer			O6, O7	O7,O8
Analyser	O10			O9
Evaluer			O11	O11
Créer	O4	O5		

10. O10 : Synthétiser les étapes de sa recherche sous forme schématisée.

11. O11 : Discuter de manière critique la pertinence des résultats obtenus en lien avec une problématique.

Comme le montre le tableau 2.1, la plupart des activités du laboratoire touchent à des habiletés cognitives "supérieures"³ de la taxonomie d'Anderson et al. (2001) et peuvent ainsi être qualifiées de "complexes".

3. Même "appliquer" n'est pas ici utilisé au sens de reproduire un procédure connue mais d'implémenter une procédure pour accomplir une tâche non familière, même si de manière très guidée, voir Sect. 3.2

3 Analyse des activités

La problématique de la surcharge cognitive liée à la manipulation de plusieurs concepts nouveaux et à la complexité du processus d’investigation engendre des implications sur le degré de préparation et de guidage d’activités d’investigation, sans pour autant perdre une certaine complexité garantissant leur authenticité (cf. Sect. 1.2). Dans ce chapitre, les pré-requis, les moyens d’étayage et tâches d’évaluation formative proposés dans ce laboratoire seront analysés selon les axes présentés dans la Sect. 1.4.

3.1 Pré-requis

Comme il est mentionné dans ses pré-requis, ce laboratoire suppose que les apprenants aient déjà été introduits aux différents concepts qui y sont mobilisés (voir présentation du laboratoire). Il ne s’agit pas ici de “découvrir” ces concepts, mais de les mobiliser et les relier afin d’expliquer et donner sens à un phénomène qui, lui, leur est inconnu. Cette imposition de pré-acquis se trouve justifiée par les sciences cognitives et le rapport entre mémoire de travail et mémoire à long-terme. Si l’apprentissage implique une altération (structuration et architecture des connaissances) de la mémoire à long terme, le processus de construction consciente et de stockage dans cette mémoire se fait au travers de la mémoire de travail. Or cette dernière a une capacité de traitement très limitée (temps et quantité d’éléments) lorsqu’elle a affaire à de nouvelles informations (cf. Sternberg 2008, Croisile 2009). Cependant, lorsque la mémoire de travail est activée en parallèle avec la mémoire à long-terme par la récupération et mobilisation de connaissances préalablement stockées dans cette dernière, ces limitations disparaissent (Kirschner et al. 2006). Etant donné que toute activité d’investigation “authentique” mobilise plusieurs connaissances conceptuelles et procédurales à la fois (Chinn and Malhotra 2002), il apparaît donc nécessaire que ces concepts soient acquis au préalable afin d’éviter la surcharge cognitive de la mémoire de travail.

Il ne faut pas oublier que pour parvenir à penser de manière productive, un chercheur véritable se repose sur une vaste connaissance conceptuelle de son sujet ainsi que sur des connaissances procédurales liées au raisonnement scientifique (Kyle 1980). Lorsque l’élève ne maîtrise que peu ces connaissances, le guidage devra être très serré afin d’éviter que la démarche soit non productive au sens où l’apprenant ne parvienne pas à formuler les hypothèses attendues, planifier une expérimentation systématique et interpréter les résultats (voir Sect. 3.2).

Etant donné l'imposition de ces pré-requis (notamment pour le concept de dérivée), ce laboratoire semble adapté à des élèves de 2e ou 3e année du gymnase (possiblement avec option physique afin qu'ils puissent utiliser ce laboratoire comme projet).

3.2 Etayage

Même si les apprenants ont été familiarisés au préalable avec les connaissances conceptuelles traitées dans un laboratoire d'investigation, leur manque d'expérience de telles activités pourrait bien les faire s'éparpiller dans la complexité d'une investigation authentique (Manlove et al. 2007). Une aide "régulatrice" s'impose, soit de la part de l'enseignant, soit sous forme de questions et de pistes incorporées aux activités (De Jong and Van Joolingen 1998), ce que j'ai choisi pour ce laboratoire puisqu'il s'adresse directement aux apprenants (avec la possibilité de le réaliser de manière autonome).

Pour pallier au problème de la surcharge cognitive et faciliter l'acquisition des objectifs d'apprentissage (voir Sect. 1.2), Reiser (2004) propose deux éléments d'étayage ("scaffolding") des activités d'investigation : (1) la structuration des tâches et (2) la problématisation ("problematising"). La structuration fournit un *cadre de guidage méthodologique* à la recherche en la découpant en étapes (orientation, hypothèse, etc.). Elle a pour but de réguler la planification de l'investigation, voire carrément d'explicitier le type de mesure à prendre pour que les élèves puissent avoir les "bonnes données" afin de faire les bonnes déductions, comparaisons etc. La problématisation s'effectue plutôt au travers d'une régulation "on-line" (Mottier Lopez 2007) en *pointant aux élèves les éléments clés* sur lesquels porter leur attention sélective (Sternberg 2008) pour créer les déclics (voir Dufresne and Gerace 2004, au sujet du pointage d'éléments dans des problèmes conceptuels), ainsi qu'en les *guidant par le questionnement à formuler des explications au bon moment*, à *mobiliser leurs connaissances préalables et connecter les concepts* (facilitant ainsi le stockage dans la mémoire à long terme Croisile 2009). Ces deux types d'étayage permettent aussi d'impliquer l'élève en le mettant en réflexion constante dans les étapes du processus d'investigation ("pensée active") tout en le conscientisant dans son apprentissage (Minner et al. 2010).

Voici des exemples d'étayage par *problématisation* tirés du laboratoire et en lien avec les objectifs d'apprentissage de celui-ci (voir Sect. 2.2). Les questions suivantes sont des *pointages d'éléments clés sur lesquels l'apprenant doit se focaliser*, listés avec la page de la présentation à laquelle ils se trouvent et l'identifiant de l'objectif s'y rapportant (entre parenthèse) :

- p.16 (O4) Quelles sont les deux variables clés du diagramme ? Laquelle des deux varie dans notre cas ?
- p.47 (O4) De quoi dépend la vitesse d'implosion V_c ?
- p.66 (O3) Que devient la bulle à l'instant T_c et après ? Pouvez-vous établir une analogie avec un ressort ? Quels sont les points communs ?

Les questions suivantes poussent l'apprenant à *formuler une explication au bon moment*, au sens

où elles déclenchent chez l'apprenant une réflexion proactive permettant d'anticiper la stratégie à suivre, la prochaine étape du processus ou d'approfondir un aspect du phénomène à étudier qui aurait pu leur échapper :

- p.17 (O1) Qu'advient-il des bulles (dites de "cavitation") lorsque la pression augmente à nouveau ?
- p.42 (O6, O7) Comment vous y prendriez-vous pour estimer la durée de vie de la bulle et la durée de son implosion (c.à.d. la durée entre le moment où elle atteint un rayon maximal et l'instant où elle collapse complètement) ? Quelle est l'information dont vous auriez besoin pour y répondre ?
- p.44 (O6, O7) Comment pourrait-on s'y prendre pour effectuer une mesure qui caractérise la vitesse moyenne avec laquelle la bulle implose ?
- p.45 (O7) Comment vous y prendriez-vous pour estimer la durée de vie de la bulle et la durée de son implosion (c.à.d. la durée entre le moment où elle atteint un rayon maximal et l'instant où elle collapse complètement) ? Quelle est l'information dont vous auriez besoin pour y répondre ?
- p.47 (O4) Que se passerait-il si on diminuait la pression dans le liquide ? (Notons que cette question génère un possible sous-cycle d'investigation)
- p.55 (O7) Comment pourrait-on représenter le phénomène (graphiquement) ?
- p.65 (O8) Que peut-on conclure de ces graphes ?

Concernant la mobilisation des connaissances et leur intégration en réseau connexe, seule l'activité 1 pousse l'apprenant à le faire durant l'activité (dans la phase de conclusion), car j'ai choisi d'inclure ce type de tâche régulative dans les évaluations formatives des activités afin de ne pas interférer avec le processus d'investigation (voir Sect. 3.3). L'activité 1 vise essentiellement le "comprendre" l'apparition des bulles de cavitation, puisqu'elle pousse l'apprenant à construire du sens pour expliquer les situations qui lui sont présentées. Dans une optique constructiviste, l'apprenant s'appuie sur des connaissances antérieures (telles que les concepts de phases, de diagramme de phase, de pression) et aboutit à la compréhension du phénomène en construisant des connections nouvelles entre ces concepts.

Voici maintenant quelques exemples d'étayage par structuration mis en place dans la présentation du laboratoire :

- Les activités ont été "découpées" selon la structure du cycle d'investigation GO-LAB (voir Sect. 2.1) et les phases du cycle d'investigation sont indiquées en couleur dans l'en-tête de chaque page de la présentation. Cette indication a non seulement pour but de ne pas perdre l'apprenant dans son cheminement en le situant dans le processus de recherche, mais aussi de le familiariser avec la structure du processus d'investigation (bien qu'il n'y ait pas de cheminement unique, Chinn and Malhotra 2002).
- Le choix des films proposés dans la phase d'orientation de l'activité 1 est imposé à l'apprenant afin de créer une situation déclenchante (Comment des bulles de vapeur peuvent-elles apparaître dans un liquide froid ?).

- L’expérience de la seringue dans l’activité 1 a été choisie à la place de l’élève à cause de sa simplicité et son efficacité pour déclencher la question de l’implosion des bulles. Idem avec l’applet proposée, qui permet de déduire simplement le principe de Bernoulli (sans requérir à des concepts théoriques de fluides incompressibles).
- Le logiciel Regressi-Regavi est imposé pour la mesure de V_c , $R(t)$, $v(t)$, même si ces mesures résultent de questions de recherche.

On peut objecter que dès lors qu’une activité d’investigation est étayée ainsi, elle n’a plus guère à voir avec l’idée de “pédagogie par la découverte” avec un guidage minimal, et le manque de liberté de décision de l’apprenant mène à questionner la différence avec un laboratoire traditionnel basé sur le suivi d’une procédure. La différence se joue pourtant dans le *degré d’implication et de conscientisation* de l’apprenant au travers de l’activité dans une perspective de construction des savoirs (Minner et al. 2010). Dans un laboratoire traditionnel, l’élève suit un montage, une procédure de mesure, puis seulement à la fin est amené à analyser l’expérience (p.ex. pour vérifier une loi vue en cours). Durant la réalisation de la tâche, il est essentiellement dans le “faire”, empêchant une construction “en profondeur” des connaissances en vue de les secondariser (van Joolingen et al. 2005). Alors que dans une activité d’investigation, quand bien même guidée de manière serrée, l’élève est constamment impliqué en “pensée active” pour formuler des hypothèses, des questions de recherche, des idées d’expériences, des explications sur le phénomène étudié et ses propres processus de pensée. En effet, plusieurs des questions de pointage et guidage évoquées plus haut sont en fait des questions de nature *métacognitives*, poussant l’élève à réfléchir sur son processus de pensée et les informations dont il a besoin pour y parvenir (Doly 2006). Dans la même veine, l’indication explicite des objectifs d’apprentissages à coté des questions de guidage-pointage dans la présentation veut favoriser l’élève à s’auto-réguler en rapportant consciemment son raisonnement aux objectifs.

Cependant, le format actuel de la présentation (permettant l’autonomie de l’apprenant) et son guidage serré sont critiquables au sens où ils ôtent à l’apprenant la liberté de pouvoir prendre en charge une partie de ses apprentissages. Par exemple, pour reprendre certains éléments facilitant la responsabilisation des apprentissages tels que présentés par Minner et al. (2010), l’élève n’est pas libre ici de concevoir un plan d’investigation et de le raffiner en lien avec ses questions de recherche ; il n’est pas libre de choisir comment organiser les données ; il n’est pas libre non plus de décider des stratégies à utiliser pour résumer, interpréter ou communiquer ses résultats. De plus, si l’élève réalise l’activité de manière autonome et individuelle, alors ce fonctionnement ne lui permet pas de prendre en charge les apprentissages en interaction sociale. En particulier, il ne pourrait pas identifier où lui ou ses collègues auraient besoin d’aide ou d’informations supplémentaires et à demander cette aide, ce qui ferait avancer les apprentissages du groupe (selon une approche socio-constructiviste, Minner et al. 2010, Bransford et al. 2000).

Donc si les activités impliquent bien les élèves dans un raisonnement actif et conscient de leurs apprentissages, elles ne favorisent que peu la prise de décision et la responsabilisation face aux apprentissages.

3.3 Évaluation formative

Pour toutefois favoriser une certaine prise en charge des apprentissages en lien avec les objectifs, j'ai inclus à la suite de chaque activité une "évaluation formative" permettant à l'apprenant de se situer dans l'acquisition des objectifs, de synthétisant les concepts mobilisés de manière intégrée, et de s'auto-réguler au travers de tâches critériées. Dans le cas où le laboratoire est réalisé sous le guidage d'un enseignant, ces questions d'évaluation peuvent lui donner des pistes pour évaluer les élèves de manière interactive ("on-line") ou rétro-active (en "différé", Mottier Lopez 2007) .

Il convient de préciser ce que j'entends par "évaluation formative" dans ce cadre. Le but de l'évaluation formative est généralement de favoriser la régulation-adaptation des apprentissages orientée vers des objectifs (Mottier Lopez 2007), par (1) l'auto-régulation des élèves pour se situer sur une trajectoire de développement des apprentissage et rectifier leur trajectoire et (2) une adaptation des moyens de guidage et de la séquence d'apprentissage par l'enseignant. Comme la présentation du laboratoire virtuel est destinée aux apprenants, elle ne contient pas d'instructions destinées aux enseignants sur le type d'erreurs auxquelles on peut s'attendre de la part des élèves, et les feedbacks régulatifs à effectuer en fonction. L'un des buts de l'évaluation formative, à savoir de rendre visible les processus de pensée de l'apprenant à l'enseignant afin qu'il régule, se trouve donc brisé (Bransford et al. 2000). Or sans la présence de feedbacks pour l'élève sur ses processus cognitifs, sur comment les corriger, *et* la mise en oeuvre d'activités nouvelles basées sur l'information obtenue par les questions d'évaluation (c.à.d. l'adaptation de l'enseignement-apprentissage), on ne peut pas parler proprement de "régulation" (puisque la boucle de feedback permettant l'adaptation reste ouverte Wiliam 2011). L'inclusion de ces informations à l'attention de l'enseignant dans un document séparé serait l'un des axes de développement de cette activité. En effet, la pertinence et l'efficacité des feedbacks vers l'acquisition des objectifs d'apprentissage dépend de leur préparation à l'avance, à l'aide notamment de l'analyse des objets d'apprentissage, des types d'erreurs-types qui s'y rapportent et en gardant pour but les objectifs d'apprentissage (Black and Wiliam 1998). Les questions de guidage et d'auto-évaluation proposées au sein de ce laboratoire ne sont donc que des déclencheurs pour favoriser l'auto-régulation de l'apprenant dans le cas où il réalise l'activité seul (ce qui demande toutefois un très haut degré d'autonomie de l'élève !) ou, si le laboratoire se déroule en classe, de permettre à l'enseignant de les utiliser pour générer des feedbacks régulateurs.

Pour faciliter l'auto-régulation de l'apprenant, l'objectif d'apprentissage se rapportant à chaque question évaluative a été explicité, et pour les questions plus complexes (évaluant plutôt une compétence) une liste de critères et indicateurs a été proposée. Tout comme le fait de rappeler à quel objectif se rapporte une question de régulation (guidage-pointage) dans les activités permet de conscientiser l'apprenant sur sa relation avec les objectifs (voir Sect. 3.2) il permet aussi de favoriser l'auto-régulation métacognitive de l'apprenant en se posant les questions "Quel est le rapport entre cette question et l'objectif ? Comment puis-je démontrer dans

ma réponse une maîtrise de l'objectif visé ?" (Mottier Lopez and Laveault 2008).

Pour permettre l'(auto-) évaluation, j'ai proposé des solutions aux questions simples et des critères pour les questions plus complexes. Parmi les tâches d'(auto-)évaluation proposées figurent à la suite de l'activité 1 et 3 trois tâches de nature complexe se référant aux compétences visées et suscitant une (auto-)évaluation "critériée" (Gérard and Lannoye 2009). Il s'agit essentiellement de tâches de type "synthèse par le diagramme" poussant l'apprenant à intégrer dans un schéma différents éléments : soit les étapes de la démarche scientifique (compétence 2), soit différents moyens graphiques et concepts permettant d'expliquer un phénomène (compétence 4). Se pose alors la question de la pertinence des critères d'évaluation par rapport aux compétences visées et aux objectifs d'apprentissage. Les critères choisis ici ont été hiérarchisés selon les priorités que j'ai définies, mais ils peuvent naturellement varier selon les exigences de l'enseignant. Dans le cas présent, l'accent est mis sur l'intégration de manière structurée et ordonnée de diverses illustrations schématiques (graphes, légendes, blocs etc.) afin d'intégrer de manière la plus synthétique et visuelle les connaissances mobilisées dans l'activité, mais on aurait aussi pu mettre l'accent sur la capacité de rédiger ses démarches de recherche, par exemple.

Pour revenir sur le caractère "formatif" de l'évaluation discuté plus haut, les tâches d'évaluation critériées intégrées dans ce laboratoire le justifient en partie. En exigeant de l'apprenant qu'il organise ses connaissances de manière connexe (dans une représentation schématique), ces tâches facilitent le stockage et la récupération de ces concepts dans la mémoire à long terme et par conséquent leur secondarisation (justifié par les apports des sciences cognitives, Kirschner et al. 2006, Sternberg 2008, Croisile 2009). Comme mentionné dans la Sect. 3.1, les activités de ce laboratoire ne visent pas l'acquisition de connaissances conceptuelles nouvelles chez les élèves (hormis la relation pression-vitesse de Bernoulli), mais la mobilisation et la secondarisation de concepts existants à travers un processus de recherche et une situation nouvelle. Par exemple, afin d'expliquer la situation nouvelle que représente l'apparition de bulles de cavitation, les élèves doivent établir une connexion entre pression et changement de phase à travers une lecture nouvelle du diagramme de phase de l'eau. Il s'en suit un établissement ou renforcement des connexions entre les connaissances conceptuelles que sont les phases de l'eau, la pression et la température. On pourrait en dire de même au sujet de la mesure de la vitesse moyenne d'implosion de la bulle, exigeant des élèves qu'ils transfèrent leur conception de vitesse moyenne vue en mécanique dans le cadre du déplacement d'un objet au contexte du mouvement de la "paroi" de la bulle (sans pour autant que la bulle ne se déplace dans sa globalité). Apprendre aux élèves à secondariser leurs connaissances à de nouvelles situations est de prime importance non seulement afin de garantir un apprentissage construit en profondeur comme inter-connexion de concepts utilisable dans différents contextes (Bransford et al. 2000), mais aussi pour garantir que l'apprentissage soit utile au futur de l'élève qui sera constitué de problèmes inconnus à l'heure actuelle ¹.

1. Voir la conférence de Marcel Lebrun : <https://www.youtube.com/watch?v=3eAyvzPFmf0>

3.4 Authenticité épistémologique

Même si le sujet d'étude de ce laboratoire est inspiré par des travaux de recherche véritables (par le groupe de cavitation du Laboratoire des Machines Hydrauliques de l'EPFL, cf. Sect. 1.4), le degré d'étayage des activités peut être compromettant quant au développement de facultés de raisonnement scientifique et d'une vision épistémologiquement authentique de la science (voir arguments 1 et 2 de la Sect. 1.1). Ici j'analyserai la similitude qualitative des activités du laboratoire avec la recherche véritable en me basant sur le cadre théorique développé par Chinn and Malhotra (2002). Ce cadre permet de différencier entre des tâches d'investigation authentiques et des "tâches simples" en répertoriant les habiletés cognitives mobilisées dans les deux cas. Par "tâche simple", ces auteurs entendent des expériences ou observations suivant une procédure prescrite dans le but de vérifier un principe théorique énoncé à l'avance, souvent en ne manipulant qu'une seule ou deux variables et sans discuter de la validité des résultats et d'explications alternatives.

Les habiletés cognitives de raisonnement scientifique "authentique" ont été classées par ces auteurs en six catégories pour lesquelles le laboratoire sera critiqué :

1. *Formuler une question de recherche ou une hypothèse* : Alors que cette faculté est omise dans les tâches simples, l'activité 1 requiert de l'apprenant la formulation d'une hypothèse et l'introduction aux activités suivantes le pousse à générer des questions de recherche testables.
2. *Concevoir une étude pour répondre à une question de recherche* : De par son étayage par structuration (voir Sect. 3.2, le laboratoire ne développe pas les facultés de "sélection de variables" et de "planification de procédures". De manière analogue aux tâches simples, les élèves n'ont que peu de variables à manipuler (qui sont prescrites, comme dans l'étude de la géométrie du conduit sur la pression et vitesse, voir activité 1) et les procédures sont imposées également. Il y a une exception : la suggestion d'étudier l'effet de la pression du liquide sur l'implosion des bulles (voir sous-cycle d'investigation possible dans l'activité 2). Moyennant l'ajout de données supplémentaires en ligne, on pourrait aussi laisser à l'apprenant la liberté d'étudier l'effet de la température de l'eau².
3. *Faire des observations* : Tout comme dans une tâche simple, le laboratoire ne discute pas des biais d'observations (ce qui est en partie justifié par la précision des données de la caméra rapide et l'aspect qualitatif des conclusions à tirer). Dans l'activité 3, on pourrait cependant demander à l'élève de discuter des limitations de la caméra pour résoudre les derniers instants de l'implosion.
4. *Expliquer des résultats* : Par la nature plutôt qualitative des observations (surtout dans l'activité 1 et 3), le laboratoire ne travaille pas la faculté de "trouver des artefacts" et très peu celle de "transformer les observations" (ici en graphes et schémas conceptuels).

2. Notre setup expérimental permettant à la fois de faire varier la température et la pression de l'eau.

Par contre, le “raisonnement indirect” est stimulé : dans l’activité 1, c’est par une chaîne d’inférence qu’on peut relier l’apparition des bulles à leur causes. De même, relier la durée de vie des bulles, la vitesse d’implosion mesurée, l’évolution de la bulle aux violent dégâts d’érosion produits par les bulles demande un raisonnement très spéculatif (même si les mesures répondent aux questions de recherche). En guise d’amélioration, on pourrait demander aux élèves dans quelle mesure leurs résultats permettent d’expliquer les dégâts d’érosion (S’agit-il d’une inférence spéculative ? De quelles informations dispose-t-on vraiment sur les mécanismes d’érosion ?)

5. *Développer des théories* : De manière simpliste, l’activité 1 amène les élèves à construire des liens explicatifs (cause-effet) entre des concepts, donc un “modèle” (au sens de Anderson et al. 2001), mais contrairement à la recherche véritable, ce modèle ne se base que sur une seule expérience.
6. *Etudier des rapports de recherche* : Alors que les chercheurs véritables investissent beaucoup de temps à étudier la recherche de leurs pairs, cet aspect n’est pas traité ici. Des lectures simples et didactisées pourraient cependant être fournies aux élèves pour faciliter leur formulation de questions de recherche.

Donc si bien le laboratoire virtuel analysé présente certaines similitudes avec la recherche véritable quant à la formulation de questions de recherche, l’explication de résultats et le développement de modèle explicatif, il n’exerce pas directement les facultés d’observation, de conception d’expérience et d’étude de rapports. Même si l’étayage nuit au développement de certaines de ces facultés, il permet néanmoins une conscientisation de l’apprenant quant au déroulement du processus de recherche (comme argumenté dans la Sect. 3.2).

4 Conclusions

Ce mémoire a présenté une analyse d'un laboratoire virtuel éducatif d'investigation à l'attention d'élèves du secondaire 2, que j'ai développé au cours de mes études HEP dans le but de l'intégrer dans la plateforme de laboratoire virtuels Go-Lab. Se fondant sur les recherches que nous effectuons sur les bulles de cavitation à bord de vols paraboliques (par le groupe "Flash&Splash" du Laboratoire des Machines Hydrauliques, EPFL), une thématique moderne et inspirante pour les jeunes, les activités de ce laboratoire veulent conduire les élèves au travers d'une démarche de recherche complexe et authentique, à l'image de travaux de semestre dans notre laboratoire. Les activités parcourent en effet toutes les différentes phases du cycle d'investigation (voir Sect. 2.1) et ce faisant, elles exercent plusieurs des habiletés cognitives propres à la recherche "authentique" (Chinn and Malhotra 2002) : la pose d'hypothèse et de questions de recherche, l'explication d'observations par inférences, le développement d'un modèle. A travers ce processus, le laboratoire souhaite développer des compétences telles que "mener à bien un travail de recherche depuis la pose de questions de recherche à l'analyse de données pour l'élaboration de conclusions" ainsi que "mobiliser différentes connaissances de manière intégrée pour traiter une situation nouvelle" (cf. Sect. 2.2). Le laboratoire implique donc un certain degré de complexité par la mobilisation de plusieurs concepts (tels que pression, phases de l'eau, vitesse comme dérivée) et connaissances procédurales (graphiques, manipulation du logiciel Regressi-Regavi), la complexité du processus d'investigation, et l'activation d'habiletés cognitives supérieures selon Anderson et al. (2001) (voir aussi Sect. 2.2).

Pour pallier au risque de surcharge cognitive de la mémoire de travail engendré par la manipulation de plusieurs connaissances nouvelles, le laboratoire exige comme pré-requis que ces connaissances aient été introduits au préalable afin qu'ils soient déjà stockés dans la mémoire à long terme (voir Sect. 3.1). L'imposition de ces pré-requis conceptuels et procéduraux suggère que la laboratoire soit utilisé avec des élèves de 2e ou 3e année qui aient déjà acquis un certain degré d'autonomie et une propension à s'auto-réguler, surtout si les élèves réalisent ce laboratoire de manière autonome (dans le canton de Vaud, préférablement 2 ou 3 OSPM).

Le format virtuel du laboratoire permet d'y intégrer un étayage par "structuration" et "problématisation" (voir Sect. 3.2). La structuration permet d'éviter que les élèves se perdent dans le processus d'investigation en fournissant une structure les guidant au travers d'étapes d'investigations découpées et prévues à l'avance. L'étayage par problématisation est effectuée ici sous la forme de questions de pointage et guidage souvent de nature métacognitive, afin de :

favoriser l'acquisition des objectifs d'apprentissage, focaliser l'attention sélective de l'élève sur des éléments clés, et impliquer l'élève de manière active et consciente en le poussant à réfléchir sur le processus, anticiper la prochaine étape et identifier les informations nécessaires pour y parvenir. Cette conscientisation de l'élève permet d'éviter qu'il soit simplement dans le "faire" en suivant une procédure prescrite comme dans un laboratoire traditionnel.

Pour encourager l'élève à s'auto-réguler en lien avec les objectifs d'apprentissage, ces derniers sont rappelés à côté des questions d'étayage et d'évaluation formative suivant chacune des trois activités. Ces évaluations formatives contiennent non seulement des questions courtes se rapportant aux différents objectifs d'apprentissage, mais aussi des (auto-)évaluations critériées pour travailler une compétence complexe tout en permettant à l'élève de s'auto-réguler en suivant des critères (voir Sect. 3.3). Les questions d'évaluation critériées visent à ce que l'élève intègre des éléments conceptuels ou procéduraux de manière schématique. Ce type de représentation visuelle et synthétique facilite le stockage des connaissances sous la forme d'un réseau connexe et facilite leur récupération et secondarisation selon les sciences cognitives (Bransford et al. 2000, Sternberg 2008, Croisile 2009).

Le haut degré d'étayage (surtout par la structuration) des activités ont cependant le désavantage de ne pas laisser à l'apprenant la responsabilité de prendre en charge ses apprentissages et son cheminement de recherche (p.ex. il ne conçoit pas lui-même les étapes de sa recherche ni l'organisation et la communication des résultats, voir Minner et al. 2010, et la Sect. 3.2). Du même coup, les activités manquent à exercer certaines habiletés cognitives propres à la recherche authentique, en particulier "planifier des procédures" et "décider du type de mesures à effectuer" (Chinn and Malhotra 2002). Cela pourrait s'avérer démotivant pour un élève qui aurait l'habitude d'activités d'investigation et l'on pourrait viser à développer un rapport au savoir plus authentique en lui laissant davantage de liberté.

Plusieurs options d'amélioration de l'étayage sont envisageables pour remédier au manque de liberté de l'élève et encourager sa prise en charge du processus. Tout d'abord, les activités pourraient être mises au format "Go-Lab Inquiry Learning Space" (ILS)¹. La structure en tabulation des ILS facilite la navigation entre les étapes du cycle d'investigation, permettant à l'élève d'être plus proche de conduire lui-même les étapes plutôt que d'être conduit (même si de manière consciente comme supposé ici). Cela permettrait aussi à l'élève de faire ses propres erreurs pour créer un "déclic" et se convaincre de la nécessité d'une autre démarche ou cheminement (en suivant les suggestions de l'enseignant, Zimmerman 2007, Limón 2001). Cela nécessiterait un support régulateur à l'attention de l'enseignant incluant le type d'obstacles et d'erreurs attendues et le guidage-pointage à effectuer en conséquence (afin que ce dernier prenne en charge une partie de l'étayage). Une autre option serait d'inclure un étayage "intelligent" dans l'ILS (voir p.ex. dispositifs développés par Khan academy, Thompson 2011). Au lieu de questions et

1. Voir l'activité 1 mise dans ce format en anglais : <http://graasp.epfl.ch/metawidget/1/6f49c797b0941c05b05b542d6b99d152ff0c2c54> et autres prototypes disponibles sur : <http://graasp.epfl.ch/#url=Protos>

astuces de guidage-pointage figées, il s'agirait d'un système d'étayage répondant en fonction du type d'erreur conceptuelle ou procédurale de l'élève. Dans le cas présent, cette implémentation serait toutefois complexe à cause de la multiplicité possible du cheminement d'investigation et des parties du laboratoire qui sont non intégrables à l'ILS (telle que l'applet utilisée dans l'activité 1 ou le logiciel Regressi-Regavi).

A Article à l'attention des enseignants et élèves

L'appendice vient à la suite du présent document. Il s'agit d'un article originalement écrit à l'attention des élèves et enseignants afin de motiver et diffuser l'usage du laboratoire analysé dans ce mémoire, tout en y présentant un résumé du contenu des différentes activités du laboratoire. Cet article n'a pas été publié dans une revue et son contenu est sujet à être révisé.

Bibliographie

- Alberts, B., 2009, Restoring science to science education, *Issues in Science and Technology*, 25, 77
- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Bloom, B. S., 2001, A taxonomy for learning, teaching, and assessing : A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives, Allyn & Bacon
- Black, P., Wiliam, D., 1998, Assessment and classroom learning, *Assessment in education*, 5, 7–74
- Bransford, J. D., Brown, A. L., Cocking, R. R., et al., 2000, How people learn, National Academy Press Washington, DC
- Brown, A. L., Campione, J. C., 1994, Guided discovery in a community of learners., The MIT Press
- Chinn, C. A., Malhotra, B. A., 2002, Epistemologically authentic inquiry in schools : A theoretical framework for evaluating inquiry tasks, *Science Education*, 86, 175–218
- Croisile, B., 2009, Tout sur la mémoire, Odile Jacob
- De Jong, T., Van Joolingen, W. R., 1998, Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains, *Review of educational research*, 68, 179–201
- De Ketele, J.-M., Gerard, F.-M., 2005, La validation des épreuves d'évaluation selon l'approche par les compétences, *Mesure et évaluation en éducation*, 28, 1–26
- Doly, A.-M., 2006, La métacognition : de sa définition par la psychologie à sa mise en œuvre à l'école., *Apprendre et Comprendre. Place et rôle de la métacognition dans l'aide spécialisée.*, pp. 84–124
- Dufresne, R. J., Gerace, W. J., 2004, Assessing-to-learn : Formative assessment in physics instruction, *The Physics Teacher*, 42, 428–433
- Dufresne, R. J., Gerace, W. J., Mestre, J. P., Leonard, W. J., 2005, Ask-it/a2l : Assessing student knowledge with instructional technology, arXiv preprint physics/0508144
- Gérard, F.-M., Lannoye, C., 2009, Évaluer des compétences : guide pratique, De Boeck

- Kirschner, P. A., Sweller, J., Clark, R. E., 2006, Why minimal guidance during instruction does not work : An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching, *Educational psychologist*, 41, 75–86
- Kyle, W. C., 1980, The distinction between inquiry and scientific inquiry and why high school students should be cognizant of the distinction, *Journal of Research in Science Teaching*, 17, 123–130
- Limón, M., 2001, On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change : A critical appraisal, *Learning and instruction*, 11, 357–380
- Lubart, T., Besançon, M., Barbot, B., 2011, Epoc : Evaluation of potential creativity
- Manlove, S., Lazonder, A. W., de Jong, T., 2007, Software scaffolds to promote regulation during scientific inquiry learning, *Metacognition and Learning*, 2, 141–155
- McConnell, N. J., Medling, A. M., Strubbe, L. E., Moth, P., Montgomery, R. M., Raschke, L. M., Hunter, L., Goza, B. K., 2010, A College-Level Inquiry-Based Laboratory Activity on Transiting Planets, in *Learning from Inquiry in Practice*, (Ed.) A.-L. Hunter, Metevier, vol. 436 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 97, 1009. 3940
- Michaels, S., Shouse, A. W., Schweingruber, H. A., et al., 2007, Ready, set, science ! : Putting research to work in K-8 science classrooms, National Academies Press
- Minner, D. D., Levy, A. J., Century, J., 2010, Inquiry-based science instruction—what is it and does it matter ? results from a research synthesis years 1984 to 2002, *Journal of Research in Science Teaching*, 47, 474–496
- Morissette, J., 2007, L'évaluation des apprentissages : des croyances et des pratiques à modifier
- Mottier Lopez, L., 2007, Régulations interactives situées dans des dynamiques de microculture de classe, *Mesure et évaluation en éducation*, 30, 23–47
- Mottier Lopez, L., Laveault, D., 2008, L'évaluation des apprentissages en contexte scolaire : développements, enjeux et controverses, *Mesure et évaluation en éducation*, 31, 5–34
- Reiser, B. J., 2004, Scaffolding complex learning : The mechanisms of structuring and problematizing student work, *The Journal of the Learning Sciences*, 13, 273–304
- Rotherham, A. J., Willingham, D., 2009, 21st century, *Educational Leadership*, 67, 16–21
- Sternberg, R., 2008, *Cognitive psychology*, Cengage Learning
- Tardif, J., Fortier, G., Préfontaine, C., 2006, L'évaluation des compétences : documenter le parcours de développement, Chenelière-éducation Montréal

- Thompson, C., 2011, How khan academy is changing the rules of education, *Wired Magazine*, 126
- van Joolingen, W. R., de Jong, T., Lazonder, A. W., Savelsbergh, E. R., Manlove, S., 2005, Co-lab : Research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning, *Computers in human behavior*, 21, 671–688
- William, D., 2011, What is assessment for learning ?, *Studies in Educational Evaluation*, 37, 3–14
- Zimmerman, C., 2007, The development of scientific thinking skills in elementary and middle school, *Developmental Review*, 27, 172–223

Philippe Kobel, Docteur en Astrophysique, chercheur à l'EPFL et étudiant HEP

Envolez-vous pour étudier des bulles !

Des activités inspirées par la recherche en vol parabolique

§ Intro et lien avec cuisine

Des bulles, on n'en voit pas seulement dans le champagne ou dans une casserole d'eau bouillante. Au cœur des barrages ainsi que dans les fusées, il se forme de mystérieuses bulles qui ont le pouvoir de provoquer d'importants dégâts. Il existe même une crevette qui les utilise pour tuer ses adversaires ! Si on parvenait à comprendre et à maîtriser leur pouvoir, ces bulles pourraient trouver des applications thérapeutiques prometteuses, notamment pour attaquer des cellules cancéreuses.

Les activités éducatives du niveau secondaire dont fait l'objet cet article nous emmènent à la découverte de ces bulles et à questionner l'origine de leur violent impact. Pour cela, on analysera des bulles « parfaites » qui ont été filmées en apesanteur lors de vols paraboliques!

§ Motivation des activités

Les vols paraboliques font rêver. Chaque fois que j'en parlais en classe, que ce soit en mathématique ou en physique, les élèves étaient passionnés. Mes collègues et moi-même, alors que nous étions encore étudiants à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), avons été séduits par l'aventure des vols paraboliques de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). C'est donc par le rêve qu'a commencé il y a presque 10 ans notre programme de recherche qui est à la source des activités décrites dans cet article (voir aparté « Flash & Splash ! »).

Fermez les yeux et essayer d'imaginer un instant de léviter librement, sans ressentir le poids d'aucun membre de votre corps et sans n'avoir plus aucun repère entre le haut et le bas. Est-ce difficile ? La sensation d'apesanteur défie complètement notre imagination et est donc emplie de mystère. C'est ce mystère qui nous donnent *envie* de la ressentir et de la *comprendre*.

Mais les vols paraboliques ne représentent pas seulement un contexte accrocheur pour illustrer des concepts liés à la gravité ou à la manœuvre de vol (qui implique des notions de physique intéressantes dans un cadre scolaire tels que Mouvement Circulaire Uniforme,

trajectoire balistique, voir encadré « Le mystère de l'apesanteur »), ils permettent aussi d'introduire la science qui se réalise à bord. Or la recherche en vol paraboliques touche à de nombreux domaines, allant de la physique atomique à la psychologie, en passant par la biologie, la combustion et...les bulles !

C'est ainsi qu'est née l'idée d'activités éducatives de physique permettant de manipuler des données de bulles "réelles", enregistrées à bord de l'Airbus A300 ZERO-G lors de campagnes de l'ESA. Ces activités visent non seulement à mettre en pratique certains concepts physiques (pression, phases de l'eau, vitesse, conservation de l'énergie), mais nous conduisent à travers une démarche d'*investigation* basée sur le questionnement, la pose d'hypothèses, la réflexion, l'exploration, la discussion. Une démarche qui *veut montrer la science telle que la font les scientifiques* et pour laquelle on pourrait bien prendre goût (N'allez pas croire que les physiciens passent leur temps à résoudre des problèmes ou à faire des calculs ! La plupart de leur temps est dédiée à l'exploration de données, à la discussion, à l'imagination de relations causes-effets et à la communication de résultats).¹

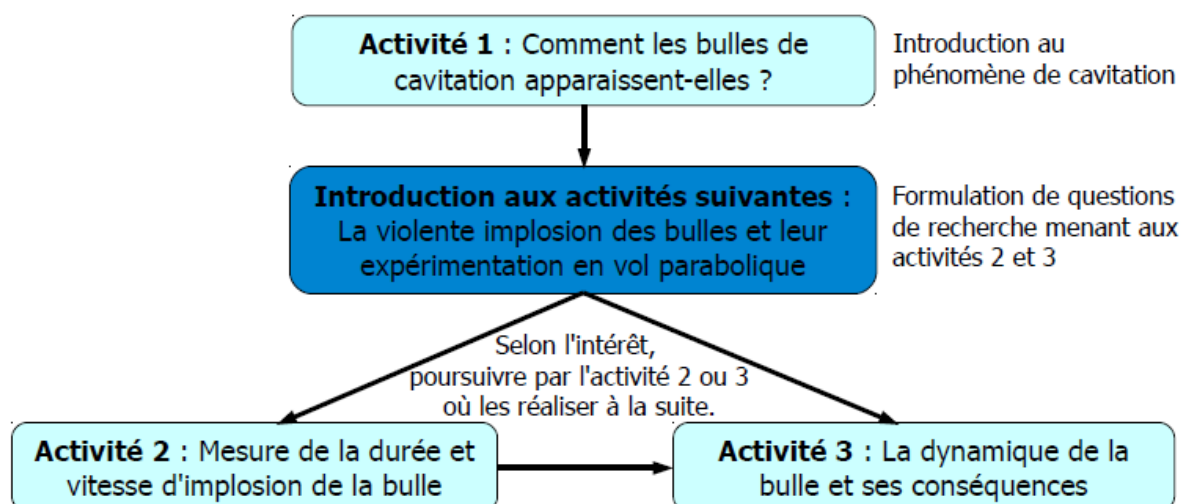
En choisissant une démarche basée sur l'investigation, j'ai aussi voulu donner la possibilité d'avoir un avant-goût de ce à quoi pourrait ressembler un projet de semestre tel que le réalisent les étudiants de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) dans notre laboratoire². Seulement (malheureusement !), pas question de manipuler ici des lasers puissants, des pompes et des circuits électriques qui pourraient être inaccessibles aux écoles. C'est pourquoi les activités font usage des nouvelles technologies sous la forme d'un laboratoire virtuel, *sur votre ordinateur*, quoi !

Ce laboratoire virtuel est composé de trois activités. En guise de support pour leur réalisation, une présentation peut être visionnée et téléchargée sur :<http://bubbles.epfl.ch/Education>



¹ Pour l'enseignement par investigation, voir par exemple le site de l'académie de Bordeaux : http://sti.ac-bordeaux.fr/techno/projets/demar_inves/html/di.htm

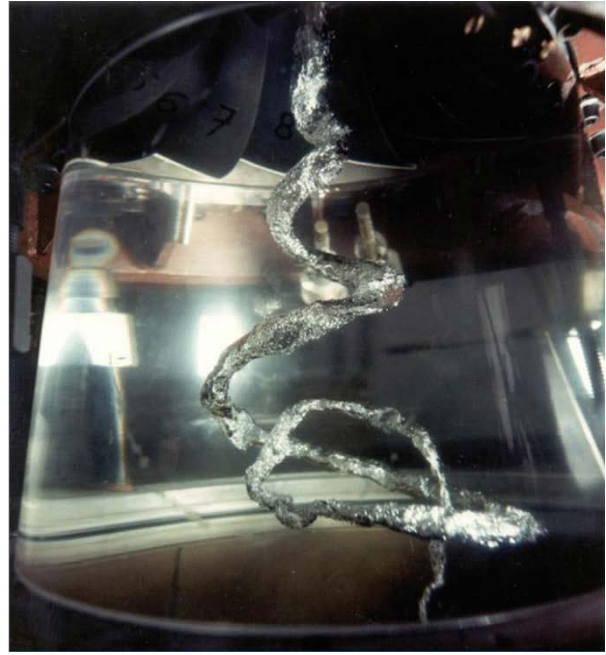
² Laboratoire des Machines Hydrauliques : <http://lmh.epfl.ch>



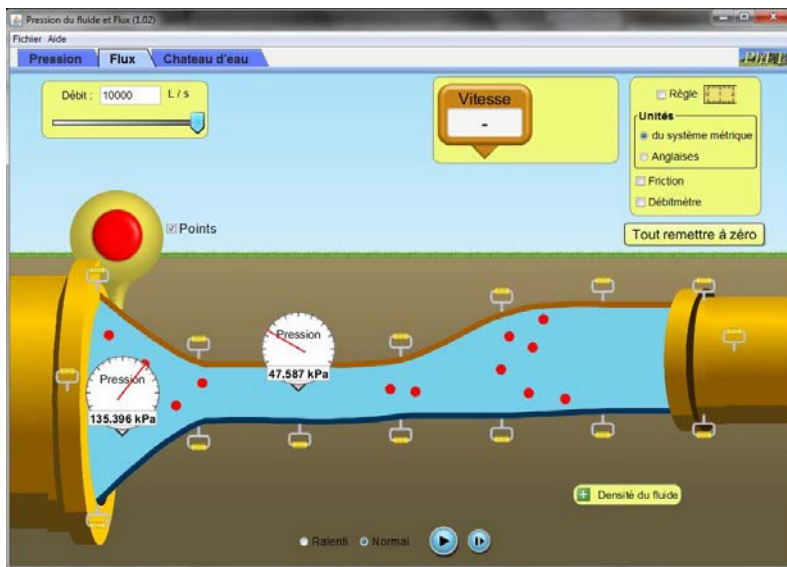
Structure des activités du laboratoire virtuel.

Activité 1 : Cette activité « introductive » nous amène à explorer et comprendre l'apparition de bulles de cavitation, auxquelles les élèves sont rarement confrontés au niveau secondaire. Dans un premier temps, on visionne des films impressionnants qui montrent l'apparition de bulles dans une turbine hydraulique (pour produire de l'électricité dans les barrages) ou lorsque la « crevette pistolet » claque ses pinces.... On est donc conduit à se poser des questions sur la nature de ces bulles et sur les points communs entre ces films. L'examen du *diagramme de phase* de l'eau (pression-température) nous permet de formuler une hypothèse sur la formation de bulles dans un liquide froid (d'après vous ?). Vous pouvez tester cette hypothèse facilement en remplissant partiellement d'eau une seringue de plastique et en fermant son extrémité hermétiquement (avec de la pâte à modeler ou des tacs pour les posters). Faites chuter la pression en tirant sur le piston de la seringue : que se passe-t-il ? C'est le phénomène de « cavitation » ! Pour pouvoir expliquer comment des bulles de cavitation se produisent dans une turbine, un conduit, ou par l'action de la pince d'une crevette, il faut alors comprendre comment ces systèmes génèrent une chute de pression. S'en suit une dernière phase d'exploration et d'expérimentation sur une applet³ où l'on peut s'amuser à varier la géométrie d'un écoulement et mesurer la conséquence sur la vitesse et la pression du liquide. Ceci permet de « sentir » de façon plus intuitive, par l'expérimentation, le fameux principe de Bernoulli.

³ Applet gratuite développée par PhET : <http://phet.colorado.edu/en/simulation/fluid-pressure-and-flow>



Gauche : La crevette « pistolet ». Droite : Nuage de bulles de cavitation tourbillonnant au cœur d'une turbine.



Applet conçue par le groupe PhET de l'Université de Colorado.

Activité 2 - Quelles évidences expérimentales peut-on apporter pour soutenir l'hypothèse de Lord Rayleigh, à savoir que l'implosion des bulles pourrait être assez violente pour éroder des machines (voir aparté « Un problème académique aux conséquences modernes »)? Mesurer la durée de l'implosion et la vitesse moyenne d'implosion fournirait une première piste.

En guise de données expérimentales, on peut télécharger gratuitement nos films de bulles générées en apesanteur à bord de vols paraboliques (<http://bubbles.epfl.ch/data>). Pour les obtenir, notre manip procède ainsi. En concentrant l'énergie d'un puissant laser dans un container d'eau, on parvient à vaporiser l'eau localement et former une bulle qui grossit jusqu'à atteindre un rayon maximum. En absence de forces d'apesanteur (et donc sans poussée d'Archimède), la bulle est parfaitement sphérique tout comme la bulle historique de Stokes. Les films, obtenus avec une caméra rapide à 100'000 images par seconde (plus d'images par seconde que de secondes en un jour !) permettent de suivre précisément l'implosion de la bulle.

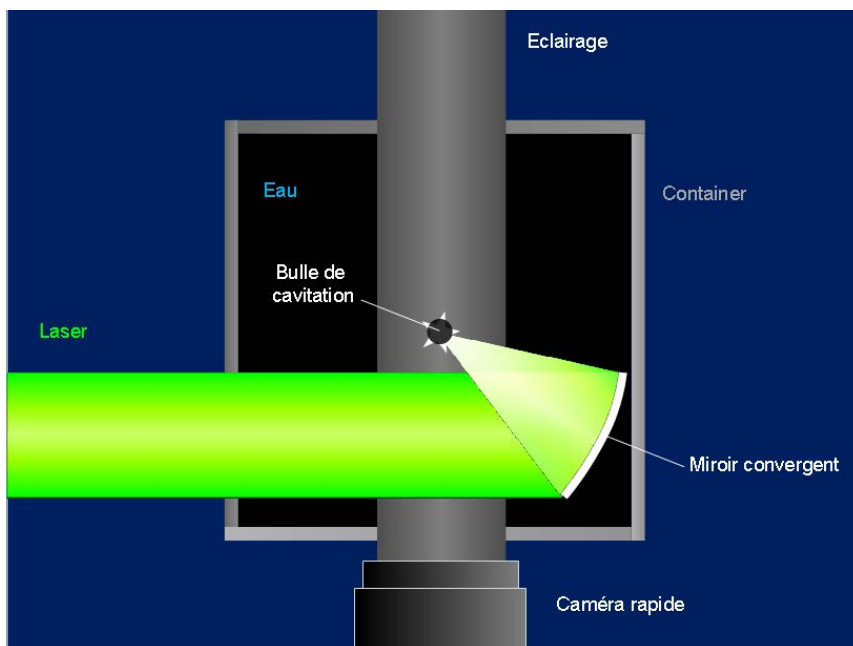
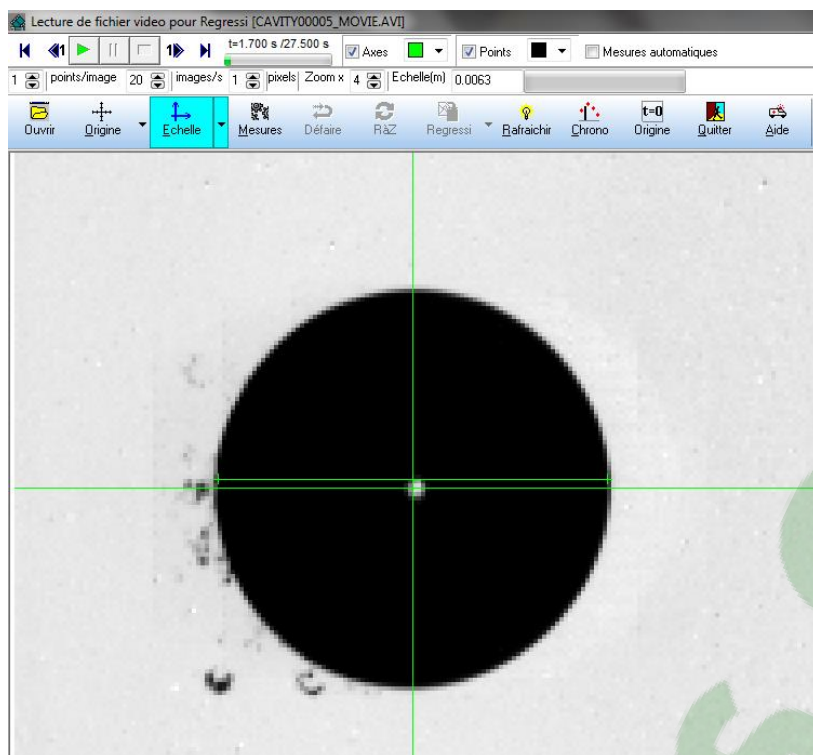


Schéma de l'expérience permettant de générer une bulle parfaitement sphérique.



Film d'une bulle parfaitement sphérique en apesanteur, visualisé avec le logiciel Regressi-Regavi.

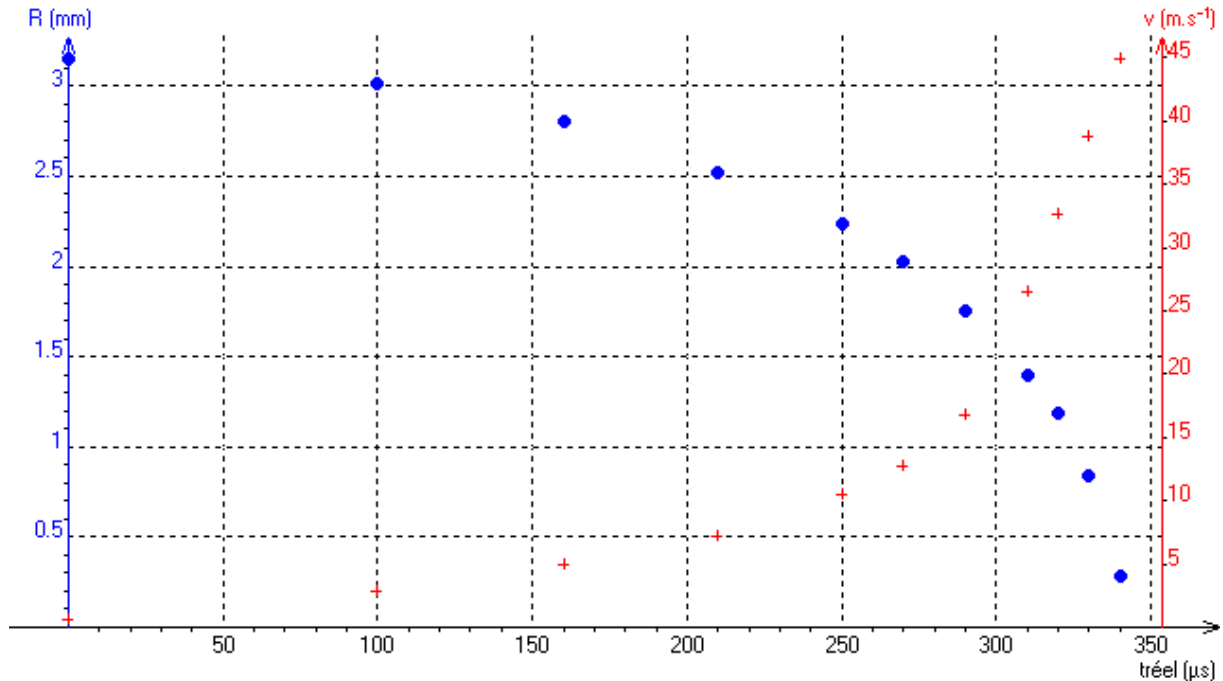
On peut ensuite utiliser le logiciel Regressi-Regavi⁴ pour visionner le film de la bulle, mesurer son rayon maximum et déterminer la durée de l'implosion (seulement une fraction de milliseconde !). Le calcul donne une vitesse allant jusqu'à 80km/h, mais il ne s'agit que d'une vitesse moyenne. Pour en savoir plus, il faut se poser la question de comment la vitesse instantanée évolue au cours de l'implosion...

Activité 3- Cette dernière activité requiert au préalable une certaine habitude du logiciel Regressi Regavi.

L'observation des films nous montre que les bulles s'effondrent de plus en plus vite. Cela nous conduit à formuler une question de recherche précise : Comment le rayon $R(t)$ de la bulle et la vitesse $dR/dt(t)$ évoluent au cours du temps ? C'est là que l'utilisation de Regressi facilite l'étude car on peut prendre des mesures du rayon de la bulle au cours de son implosion et les importer en un clic de souris dans un graphique.

⁴ Téléchargement gratuit de Regressi-Regavi : <https://sites.google.com/a/lycee-descartes.ma/labophypublic/telechargement>

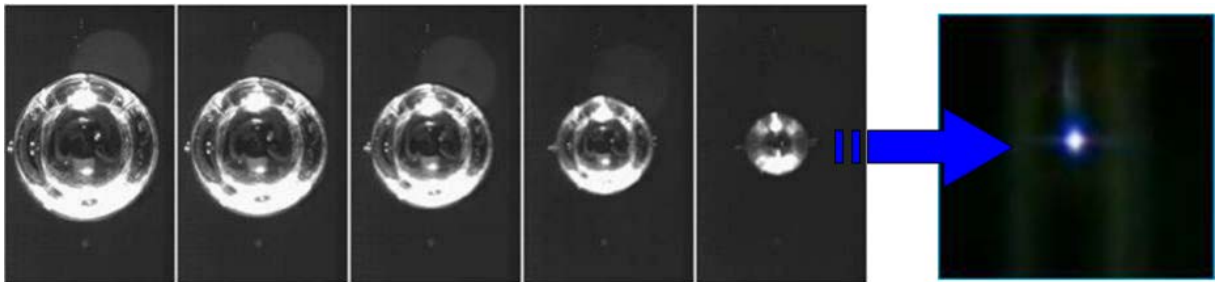
Les graphes fournissent l'évidence que la vitesse de collapse s'accroît avec le temps. En fait, la vitesse augmente tellement que même notre caméra rapide ne suffit plus à suivre la bulle à son dernier instant de vie.



Graphique traçant l'évolution du rayon R de la bulle et de sa vitesse (dR/dt) au cours du temps pendant l'implosion de la bulle.

Cela permet de supposer que la violence des bulles de cavitation est surtout liée au dernier stade de l'implosion des bulles, hypothèse qui est soutenue aujourd'hui par la recherche. Cette activité débouche donc sur une discussion sur le dernier stade de l'implosion et le mystérieux pouvoir des bulles. La vitesse peut-elle augmenter indéfiniment (Notez que dans ce cas l'énergie cinétique augmenterait indéfiniment aussi et la bulle se transformerait en un trou noir...on ne serait plus là pour en parler !)? Si non, qu'est-ce qui parvient à freiner l'implosion? Le gaz et la vapeur d'eau piégés dans la bulle font l'effet d'amortisseur et se trouvent violemment comprimés. Une compression « adiabatique » qui l'échauffe à des températures pouvant dépasser celle de la surface du Soleil. Cet échauffement ponctuel pourrait être utilisé pour traiter le cancer de manière locale (au contraire des chimiothérapies).

Mais il ne s'agit que de l'une des nombreuses applications potentielles des bulles de cavitations, pourvu que la recherche nous apprenne à les maîtriser...⁵



L'implosion d'une bulle de cavitation comprime « adiabatiquement » le gaz contenu, l'échauffant à des températures de plusieurs milliers de degrés.

« Si vous allez enseigner à faire des observations, vous devez montrer qu'elles peuvent révéler quelque chose de merveilleux. ».

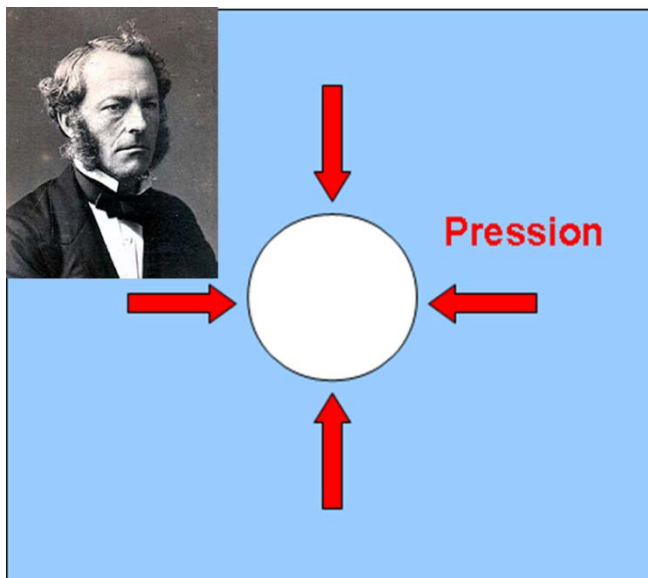
Richard Feynman

Clicours.COM

⁵ Reportage pour le téléjournal de la Télévision Suisse Romande : <http://www.rts.ch/video/info/journal-19h30/4988939-des-scientifiques-de-l-epfl-observent-la-reaction-des-bulles-pour-lutter-contre-le-cancer.html>

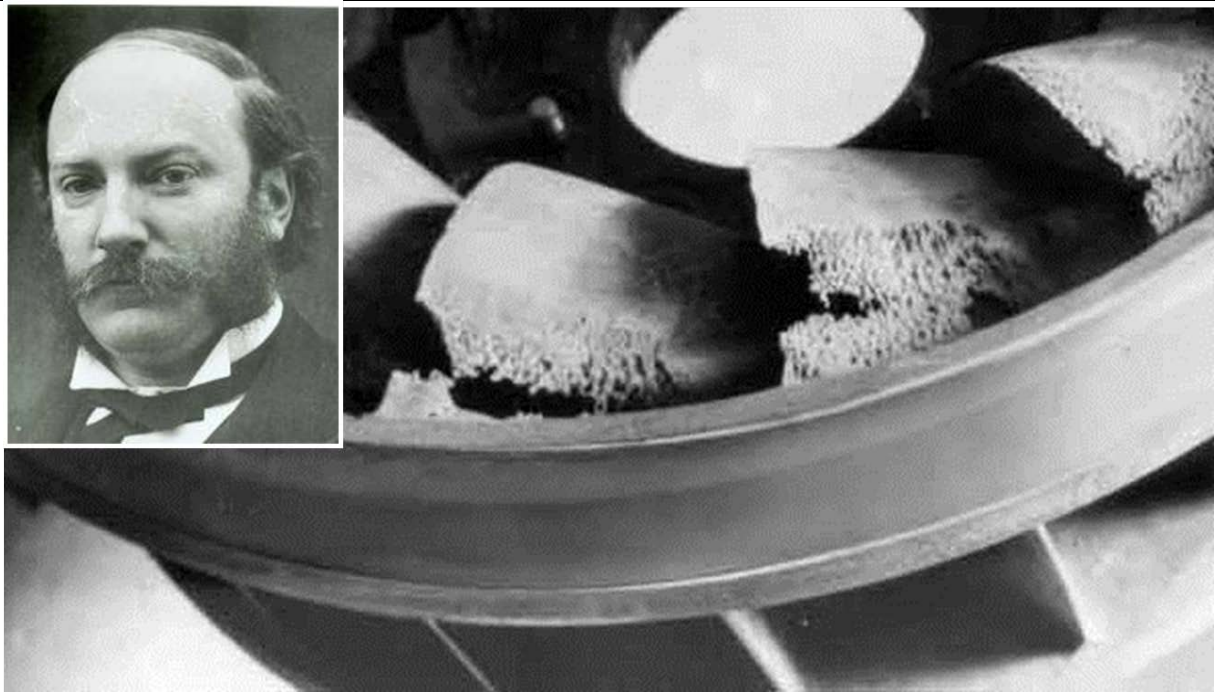
Un problème académique aux conséquences modernes

Le problème des bulles de cavitation s'est transformé d'un cas purement abstrait et académique à une thématique de recherche moderne. En 1847, le mathématicien George Gabriel Stokes demanda à ses étudiants de calculer comment une cavité sphérique vide au sein d'un liquide imploserait sous la contrainte de la pression du liquide. C'est en 1917 que Rayleigh eut une intuition : cette implosion pourrait être assez violente pour engendrer des dégâts d'érosion dans les hélices de bateaux, une érosion jusqu'alors inconnue. Aujourd'hui, la cavitation affecte de nombreuses technologies allant des fusées aux turbines hydro-électriques et fait l'objet de recherches modernes avec l'espoir que leur compréhension pourrait apporter des applications fructueuses, que ce soit pour traiter les calculs rénaux ou éliminer des cellules cancéreuses⁶.



Le problème de Stokes : Comment évolue une bulle de vide sous l'effet de la pression du liquide ?

⁶ Voir l'article du magazine de la recherche Suisse Horizons :
http://infoscience.epfl.ch/record/90769/files/Horizons%28Cavitation%29_Sept2006.pdf



Erosion par cavitation sur les pales d'une turbine. Encadré : Lord Rayleigh.

Flash and Splash ! Un projet d'étudiants à étudiants

Tout a commencé par le rêve de jeunesse de devenir astronaute, de voler en apesanteur. A la fin de nos études à l'EPFL en 2005, mes collègues et moi avons participé à un concours de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), avec un ticket pour l'apesanteur à la clé!

Notre équipe baptisée « Flash and Splash » a eu la chance d'avoir été sélectionnée, et c'est ainsi que nous nous sommes lancés dans cette aventure scientifique qui dure maintenant depuis presque 10 ans. Aujourd'hui, il s'agit d'un programme de recherche établi qui nous permet de voler chaque année à bord de l'Airbus A300 ZERO-G de l'ESA. Mais nous consacrons aussi une grande partie de notre temps à l'éducation : notre équipe a accueilli des doctorants, un projet de master et des projets de semestre. Grâce à l'activité présentée ici, les élèves du secondaire peuvent aussi y avoir accès.



Deux membres de notre équipe en apesanteur : Danail Obreschkow (gauche) et Philippe Kobel (droite).

Lisez notre blog pour des récits de nos aventures entre 2005 et 2013, ainsi que de nos prochains vols qui auront lieu du 7 au 13 avril 2014: www.flashandsplash.ch

Un film youtube sur nos premières expériences :

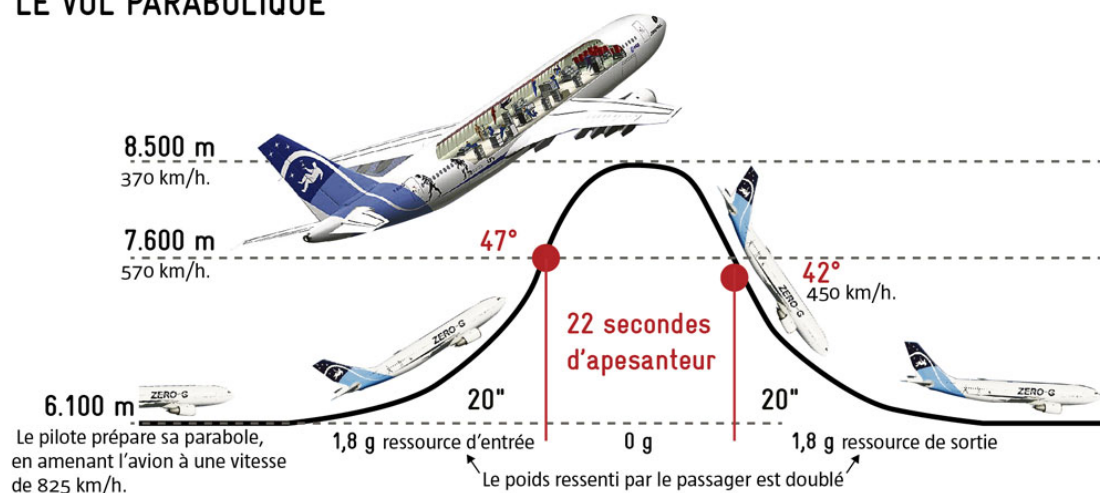
<http://www.youtube.com/watch?v=gR0YBAhY2PQ>

Le mystère de l'apesanteur

Suffit-il d'aller assez haut ? Doit-on être dans le vide ? Pour comprendre la notion d'apesanteur, il faut repenser un peu nos a priori sur la gravité. La gravitation est une loi universelle, dicit Sir Newton, donc l'Univers entier est en train de tomber ! Vous-même, en ce moment, êtes en train de tomber. Seulement le sol arrête votre chute et vous retient. C'est cette force d'écrasement contre le sol que l'on appelle « poids ». Imaginez une seconde que le sol vienne à disparaître : comment ressentiriez-vous votre poids ? Ah oui, on ressentirait tout de même la résistance de l'air (comme à vélo ou à ski)...C'est là qu'interviennent les vols paraboliques. L'idée est simple : L'avion effectue d'abord une phase ascendante, puis lorsqu'il atteint un angle de 47° avec l'horizontale (trois fois plus que l'inclinaison lors d'un décollage standard), l'avion se laisse tomber. Ou plus précisément, il garde un minimum de poussée et maintient l'incidence adéquate pour compenser la résistance de l'air. Pendant 20 secondes environ, l'avion se comporte tout comme un gros caillou que l'on aurait tiré avec un canon à la surface d'une planète sans air. Il tombe selon une trajectoire « parabolique ».

LE VOL PARABOLIQUE

Infographie le JDD - Sources : CNES et Novespace



La manœuvre entière se présente donc comme une montagne russe géante avec une phase d'accélération en montée (pendant laquelle les passagers ressentent 1,8g, c.à.d. 1,8 fois leur poids) puis la phase de chute parabolique (pendant laquelle les passagers ressentent l'apesanteur), pour finir avec la phase de sortie (encore une fois accélérée à 1,8g environ).⁷

⁷ Plus d'informations dans le film de l'ESA : <http://www.youtube.com/watch?v=MYDcqliWN8c> et le site de NOVESPACE : http://www.novespace.fr/fr_vol_presentation.html

L'avion a aussi l'avantage que l'on peut répéter cette manœuvre 31 fois (après quoi il n'y a plus de combustible). Il faut donc des scientifiques avec un estomac bien accroché !

