

Enseigner les Concepts Physiques en Océanographie

Une Approche Basée sur la Pratique

Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller, James Loftin, et Jennifer Albright.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 1

Chapitre 1. Densité 5

Encourager les étudiants à poser des questions : Une promenade dans un environnement riche 14

Chapitre 2.Pression 16

Evénements intrigants : éveiller la curiosité des étudiants 27

Chapitre 3. Flottabilité 28

Evaluer l'apprentissage de l'étudiant 35

Chapitre 4. Chaleur et température 36

Apprentissage en équipe 46

Chapitre 5. Ondes de gravité 48

Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss et James Loftin appartiennent à la School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME, USA. Herman Weller et Jennifer Albright travaillent au College of Education and Human Development, University of Maine, Orono, ME, USA. Les auteurs sont membres du Center for Ocean Sciences Education Excellence-Ocean Systems (COSEE-OS), Darling Marine Center, University of Maine, Walpole, ME, USA.

Le projet a été financé par la Division of Ocean Sciences Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE, numéro OCE-0528702) de la National Science Foundation. Les opinions, découvertes, conclusions ou recommandations exposées dans de document ne reflètent pas nécessairement le point de vue de la NSF. On peut trouver une version PDF de ce document dans la page web de The Oceanography Society (http://www.tos.org/hands_on). Les exemplaires imprimés sont disponibles sur demande à l'adresse info@tos.org.

©2009 The Oceanography Society

Publication : Ellen Kappel and Vicky Cullen
Mise en page et conception: Johanna Adams
Traduction : Jean Marie Beckers, Emmanuel Beeckmans, Jean-François Boss, Patricia Corieri, Fabrizio D'Ortenzio, Christine Delépine, Régine Dupuis, Marie-Françoise Lefèvre, Philippe Léonard, Marie le Polain, Serge Pahaut, Sylvie Pourbaix, Christine Sarrette et Guy Talin.

La reproduction partielle ou totale est autorisée pour des utilisations pédagogiques et sans but commercial. La Oceanography Society demande la mention de la source originale.

INTRODUCTION

Ce supplément du magazine *Oceanography* met l'accent sur les démarches pédagogiques qui favorisent la participation des étudiants dans l'apprentissage, et il offre un ensemble d'activités qui mobilisent à la fois les mains et la tête pour enseigner des notions physiques essentielles en océanographie. Ces notions de base comprennent la densité, la pression, la flottabilité, la chaleur (et la température) et les ondes. Nous nous concentrons sur ces concepts physiques pour deux raisons. Tout d'abord parce que les étudiants, dont l'attirance pour les sciences marines découle de leur intérêt pour les organismes vivant dans l'océan n'ont pas conscience en général du fait que la physique constitue la base d'une compréhension du fonctionnement de la mer et de tous les êtres qui y vivent. Ensuite, parce que l'enseignement actuel de l'océanographie et ses programmes de sensibilisation ont tendance à insister sure les aspects biologiques des sciences marines. Tandis que de nombreuses activités du K-12 se concentrent sur la biologie marine, on a comparativement très peu développé l'enseignement des aspects physiques et chimiques de l'environnement marin (par exemple Ford et Smith, 2000, et une collection de travaux pratiques sur le site DLESE : http://www.dlese.org/library/index.jsp). L'océan offre un contexte enthousiasmant pour enseigner les sciences en général et la physique en particulier. Utiliser comme point de départ la mer à laquelle des concepts spécifiques de physique peuvent être rattachés permet d'offrir aux étudiants en science des liens au concret, ce dont ils sont fort demandeurs.

Les travaux pratiques décrits dans ce supplément ont été développés comme éléments de la collaboration aux COSEE (Centres d'Excellence pour l'Education aux Sciences de l'Océan), entre des scientifiques et des spécialistes de la pédagogie. Ils ont été intégrés à deux cours de premier cycle (un pour la majeure science de la mer, l'autre regroupant les majeures science et éducation), et à quatre ateliers d'une semaine pour des enseignants en science du secondaire moyen et supérieur. Nous allons résumer, ci-après, notre démarche pédagogique et présenter la structure de ce supplément.

VERIFICATION OU DECOUVERTE ?

Notre approche de l'enseignement des sciences se fonde sur trois « découvertes » importantes que nous avons faites. Nous mettons le mot « découvertes » entre guillemets car de nombreuses personnes les ont faites avant nous. Pourtant, jusqu'à ce que nous les « découvrions » nous-mêmes, nous n'avions pas pris conscience de leur signification. Ce processus ressemble à celui que suivent nos étudiants, quand ils saisissent par eux-mêmes comment la physique contribue à expliquer l'environnement dans lequel ils vivent.

Nous avons tout d'abord constaté que notre manière traditionnelle d'enseigner les sciences au niveau universitaire, au moyen de la présentation et de la transmission de la matière des manuels, permettait de communiquer des faits scientifiques mais ne montrait pas de quelle manière progresse le savoir scientifique. Avec l'approche habituelle, les étudiants restent des observateurs fondamentalement passifs, avec très peu d'implication et de recherche personnelle. Mais la science ne saurait se limiter à un « ensemble de connaissances » ; c'est aussi une façon de penser et d'agir, fondée sur une démarche de questionnement. Lorsque nous « faisons » de la science, nous formulons des prévisions, nous posons des questions et émettons des hypothèses éventuellement réfutables, nous prenons des mesures, nous énonçons des généralisations et nous testons des concepts en les appliquant. D'après les Standards Nationaux de l'Enseignement de Sciences (National Research Council, 1996), « De la même manière que les scientifiques développent leur connaissance et leur compréhension en cherchant des réponses aux questions que leur pose le monde de la nature, les étudiants développent leur compréhension du monde qui les entoure en s'engageant activement dans la démarche scientifique- seuls et avec les autres. ». Les étudiants ne se posent pas de questions lorsqu'on leur enseigne les résultats de la science (c'est-à-dire des faits, des notions, des principes, des lois et des théories) et les méthodes mises en œuvre par les chercheurs. Avec notre mode traditionnel d'enseignement des sciences, on a souvent utilisé les laboratoires pour vérifier nos affirmations. Suivant cette approche, on introduisait d'abord les lois de la physique, et le laboratoire ne servait qu'à les illustrer. L'accent portait donc sur le recueil des données, leur

représentation graphique et la rédaction d'un rapport. Au cours de tels exercices manquaient le plus souvent les éléments d'exploration et d'investigation.

Nous avons enfin compris le rôle essentiel de la recherche et de la découverte pour éveiller la curiosité des étudiants et leur attrait pour la science. Les valeurs aberrantes qui apparaissent dans les mesures expérimentales présentent souvent plus d'intérêt que celles qui confirment la théorie, puisqu'elles exigent une explication qui dépasse les informations des manuels. La démarche expérimentale peut entrainer l'étudiant vers une compréhension approfondie de la méthode des sciences et l'aider à développer son esprit critique (une aptitude à laquelle la simple procédure de vérification fait rarement appel).

Notre deuxième constatation nous montre que la capacité d'un étudiant à réciter le contenu et les formules du manuel ne fournit pas nécessairement un signe de compréhension des principes physiques sous-jacents. On peut enseigner la physique à l'aide de modèles mathématiques. Les étudiants parviennent à apprendre quelles équations vont amener quels résultats chiffrés, et ce savoir sera facile à évaluer lors des examens écrits. Mais cette approche ne développe pas nécessairement chez les étudiants la faculté de reconnaître quels principes de base pourraient s'appliquer à des problèmes légèrement différents. Nous avons « découvert » que nos étudiants parvenaient à mieux apprendre et à comprendre plus profondément les notions de la physique quand ils participaient activement à leur démarche d'apprentissage – par exemple lorsqu'ils font avec leurs mains des travaux pratiques qui leur donnent l'occasion de voir et ressentir par eux-mêmes ce que les modèles mathématiques décrivent.

CREER DU SENS, APPRENDRE DE L'EXPERIENCE

Nous avons finalement constaté, et c'est notre troisième « découverte » que chaque étudiant privilégie une certaine façon d'apprendre – c'est-à-dire une combinaison qui lui est propre d'apprentissage par l'écoute, par la lecture, par l'observation, par le contact physique ou par l'action (Dunn and Dunn, 1993). Le principe « Cette façon d'enseigner a fonctionné pour moi, elle doit être bonne aussi pour mes étudiants » risque de ne pas s'appliquer à l'ensemble des étudiants. Après tout, nous, dans le milieu universitaire, constituons une minorité qui a réussi à s'adapter à ce système éducatif. Nous avons « découvert » qu'un enseignement qui incorpore divers modes pédagogiques améliore l'efficacité de nos cours et renforce l'apprentissage de nos étudiants. Il était essentiel de prendre conscience de ce que chaque étudiant ne représente pas une version jeune de nous-mêmes. Certains d'entre eux ne possèdent simplement pas la curiosité, les sujets d'intérêt et les attitudes qui motivent les chercheurs scientifiques. Seule une minorité parmi eux continuera sur la voie de la recherche. Mais tous deviendront éventuellement consommateurs de savoir scientifique, contribuables qui participent au financement de nos recherches, et décisionnaires dans les bureaux de vote et les services publics. Nous portons donc la responsabilité d'améliorer chez nos étudiants la connaissance scientifique générale et en particulier celle de l'Océanographie. Nous devons les aider à développer le savoir et les aptitudes nécessaires à des citoyens qui seront inévitablement confrontés aux défis de la science, de l'environnement et de la technique.

APPRENDRE ET ENSEIGNER PAR LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

Dans le domaine de l'enseignement des sciences, l'investigation signifie une façon d'enseigner dans laquelle on engage les élèves dans des questions ou des problèmes scientifiques. Ils essayent de les résoudre en faisant des prévisions et en les testant, en cherchant des preuves et des informations, ils formulent des explications possibles, ils les évaluent à la lumière d'explications alternatives, et ils communiquent ce qu'ils ont compris (National research Council, 2000). L'investigation « est bien plus souple que la séquence rigide des étapes communément décrite dans les manuels comme la 'méthode scientifique'. C'est bien plus que juste 'faire des expériences', et cela n'est pas confiné dans les laboratoires » (AAAS, 1993). Il existe plusieurs modèles d'apprentissages par l'investigation. Dans notre enseignement, nous utilisons des activités et des démonstrations de laboratoire « hands-on/minds-on » (on réfléchit et on agit concrètement), mais d'autres approches d'enseignement par l'investigation dont nous ne discuterons pas ici procèdent par des études de cas, des missions-projets ou des services d'apprentissage.

Nous mettons en garde sur le fait que proposer aux étudiants des expériences de laboratoire n'implique pas automatiquement que l'apprentissage par l'investigation est effectivement appliqué. Par exemple, les exercices traditionnels de laboratoire dans lesquels les étudiants doivent suivre des instructions pas à pas, à la manière d'une recette de cuisine, permettent d'illustrer un concept ou un principe scientifique, d'apprendre à utiliser des instruments de laboratoire, et dispensent une forme d'expérience pratique mais cette manière de faire néglige l'aspect d'intelligence, d'initiative et d'imagination de l'investigation. Pour que l'approche « hands on/minds-on » soit fructueuse, les étudiants doivent être encouragés à poser des questions, à faire des

prévisions et les tester, à formuler des explications possibles, et finalement à appliquer leurs nouvelles connaissances dans des contextes variés.

Les étudiants n'entrent pas dans nos classes comme des pages blanches prêtes à absorber de nouvelles informations. Au contraire, ils arrivent en classe avec des conceptions (et parfois des idées fausses) basées sur leurs expériences personnelles. L'approche d'investigation encourage les formateurs à sonder les connaissances des élèves pour identifier les idées fausses qui peuvent interférer avec les apprentissages.

L'investigation aide les étudiants à voir la science comme une façon de penser et de faire, elle les encourage à remettre leurs idées en question, et elle crée un climat dans lequel ils cherchent des solutions alternatives et des explications. Les aptitudes qui sont développées dans le processus d'investigation « avec les mains et avec la tête » - réflexion, résolution de problèmes, et communication - seront utiles aux étudiants tout au long de leur vie.

Un argument contre la mise en place de cet enseignement basé sur l'investigation avance que cette méthode d'apprentissage ne permettrait de couvrir toute la matière du programme dans le temps prescrit. Cette inquiétude est valable, si on considère les heures de cours limitées dont on dispose. Nous pensons, cependant, que si le but de l'enseignement est de promouvoir des expériences d'apprentissages significatives dans lesquelles les étudiants ne se contentent pas d'accumuler des connaissances fondamentales mais apprennent également à appliquer et à intégrer des concepts, tout en devenant des apprenants autonomes, nous devons envisager une approche basée sur l'investigation. Les retours des étudiants concernant les bénéfices que cette approche a eus sur leurs études nous ont fait réaliser que « moins est souvent plus ». Nous défendons l'enseignement basé sur l'investigation mais nous ne prétendons pas que toutes les matières devraient toujours être enseignées par cette méthode ou que tous les éléments de l'investigation (susciter des questions, rechercher des preuves, formuler des explications, appliquer ses connaissances dans d'autres situations, et communiquer et justifier ses explications [National Research Council, 2000]) doivent être présents tout le temps.

Un enseignement efficace demande l'utilisation d'une grande variété de stratégies et d'approches (Feller et Lotter, 2009) qui devraient être adaptées à chaque niveau, à chaque élève, à la taille et à la dynamique de chaque groupe, et aux objectifs d'apprentissage à long et à court termes, parmi d'autres facteurs.

COMMENT UTILISER CE DOCUMENT

Ce document est composé de cinq chapitres, chacun se concentrant sur un des concepts suivants de la physique : la densité, la pression, la flottabilité, la chaleur et la température, et les ondes. Pour chaque concept, nous donnons d'abord des informations générales puis des descriptions détaillées et ensuite l'explication des manipulations. Les activités insistent sur différents aspects de chaque concept. Cette approche permet aux étudiants d'appréhender chacun des concepts sous plusieurs angles. Ils pourront ainsi appliquer ce qu'ils ont appris à de nouvelles situations et tester leur compréhension. En plus, nous mettons en avant plusieurs approches pédagogiques qui peuvent améliorer l'enseignement et favoriser l'apprentissage (voir Feller et Lotter, 2009).

Les ateliers sont présentés ici sous la forme pratiquée dans nos classes de collège. Ces classes sont principalement composées d'étudiants de deuxième année, de juniors et de seniors en science, et de majors en science et en éducation qui ont déjà suivi un cours d'introduction à l'océanographie. Les étudiants gradués et nos collègues ont également trouvé certaines de ces activités stimulantes. Dans d'autres contextes (par exemple des groupes d'étudiants avec différents niveaux) et d'autres sections, ces activités peuvent et doivent être adaptées, avec des changements appropriés dans les documents, dans les discussions de classes, dans la description des activités et les explications. Les professeurs de science qui ont participé à nos ateliers ont adapté certaines activités avec succès dans des classes du secondaire.

Dans nos classes, les activités sont le plus souvent organisées en ateliers par lesquels passent des équipes de trois ou quatre personnes. A certains moments, nous présentons les activités en séquences d'ateliers ou de démonstrations suivies collectivement par la classe, avec les étudiants assis en petits groupes pour faciliter la discussion. Travailler en petits groupes favorise l'apprentissage et la réflexion. Souvent, nous encourageons une saine compétition entre les groupes (par ex. avec des quizz) pour ajouter un challenge stimulant.

Pendant la leçon, nous utilisons une approche d'enseignement socratique dans le sens où nous posons des questions pour les guider. Nous ne répondons pas toujours aux questions posées par les étudiants pendant les ateliers. Au contraire, nous leur renvoyons une nouvelle question qui les force à creuser leurs idées et à envisager un nouveau point de vue.

On demande également aux étudiants de faire des prévisions, de mesurer, et de trouver des explications possibles pour les phénomènes qu'ils observent. Quand les étudiants ont terminé leur atelier, le groupe se rassemble pour une discussion de

synthèse durant laquelle il est demandé à chaque groupe de proposer une explication pour une activité donnée. Offrir du temps aux étudiants pour exprimer verbalement leur point de vue et ce qu'ils ont compris est une composante essentielle de notre approche. Ce temps permet de s'assurer que les idées fausses ou les difficultés de compréhension sont identifiées, discutées, et finalement corrigées. Les applications d'un concept et ses connexions avec l'océanographie apparaissent clairement pendant la discussion ainsi que lors des travaux à domicile.

Une période de 90 minutes est parfaitement suffisante pour que les étudiants fassent quatre à six ateliers durant la première heure, ce qui laisse environ 30 minutes pour une discussion de groupe. Notez que chacun de ces ateliers peut se pratiquer indépendamment des autres ou peut également être présenté comme démonstration. La plupart des ateliers nécessitent un matériel simple et abordable que l'on peut généralement trouver en classe ou à la maison. Nous nous procurons quelques objets dans des magasins spécialisés dans l'enseignement des sciences (par ex. : sciencekit.com), et nous fabriquons une partie du matériel nous-mêmes.

REFERENCES ET AUTRES LECTURES RECOMMANDEES

American Association for the Advancement of Science (AAAS). 1993. *Benchmarks for Science Literacy: Project 2061*. Oxford University Press, New York, NY, 448 pp.

Driver, R., A. Squires, P. Rushworth, and V. Wood-Robinson. 1994. *Making Sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas*. Routledge, New York, NY, 224 pp.

Dunn, R., and K. Dunn. 1993. *Teaching Secondary Students Through Their Individual Learning Styles: Practical Approaches for Grades 7–12*. Allyn and Bacon, Boston, MA, 496 pp.

Duschl, R.A. 1990. *Restructuring Science Education: The Importance of Theories and Their Development*. Teachers College Press, New York, NY, 155 pp.

Feller, R.J., and C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. *Oceanography* 22(1):234–237. Available online at: http://tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accessed August 18, 2009).

Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.

Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science: Inquiry and Innovation in Middle School and High School*. Oxford University Press, 476 pp.

Hazen, R.M., and J. Trefil. 2009. *Science Matters: Achieving Scientific Literacy*. Books, New York, NY, 320 pp.

McManus, D.A. 2005. *Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups*. Anker Publishing Company Inc., 210 pp.

National Research Council. 1996. *National Science Education Standards*. National Academy Press, Washington, DC, 262 pp.

National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.

SITE WEB

Cooperative Institute for Research in Environmental Science (CIRES): Resources for Scientists in Partnership with Education (ReSciPE) *http://cires.colorado.edu/education/k12/rescipe/collection/inquirystandards.html#inquiry*

Perspectives of Hands-On Science Teaching *http://www.ncrel.org/sdrs/areas/issues/content/cntareas/science/eric/eric-toc.htm*

Teaching Science Through Inquiry *http://www.ericdigests.org/1993/inquiry.htm*

Science as Inquiry *http://www2.gsu.edu/~mstjrh/mindsonscience.html*

Science Education Resource Center (SERC), Pedagogy in Action, Teaching Methods *http://serc.carleton.edu/sp/library/pedagogies.html*

CHAPITRE 1. DENSITÉ

OBJECTIF

La densité est une propriété fondamentale de la matière, et bien qu'elle soit enseignée dans les écoles secondaires en sciences physiques, tous les étudiants à l'université n'en ont pas une bonne compréhension. La plupart d'entre eux mémorisent la définition, sans accorder beaucoup d'attention à son sens physique, et beaucoup l'oublient peu de temps après l'examen. En océanographie, la densité est utilisée pour caractériser et suivre les masses d'eau afin d'étudier la circulation océanique. De nombreux processus sont causés par ou reflètent les différences de densité de masses d'eau adjacentes ou les différences de densité entre fluides et solides. La tectonique des plaques et la formation des bassins océaniques, la formation des eaux profondes et la circulation thermohaline, le transport de carbone par des particules s'enfonçant de la surface vers les profondeurs sont quelques exemples de processus gérés par la densité. L'ensemble d'activités présenté ici est conçu pour examiner la densité, mettre en pratique les calculs de densité, et mettre en évidence les liens existant avec les processus océaniques.

CONTEXTE ET NOTIONS DE BASE

La densité (notée ρ) est une mesure de la compacité des matériaux, en d'autres termes la quantité de masse "tassée" dans un espace donné. C'est la masse par unité de volume ($\rho = m / V$; unités en kg m^{-3} ou g cm^{-3}), cette propriété est indépendante de la quantité de matière considérée. La densité de l'eau est d'environ un millier de fois plus grande que celle de l'air. Elle varie de 998 kg m^{-3} pour l'eau douce à température ambiante (voir par exemple, http:// www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/MISC/Water_density_Pipet_Calibration_Data.pdf) à près de 1250 kg m^{-3} dans les lacs salés. La plupart des océans ont une densité d'environ 1020-1030 kg m^{-3}. La densité de l'eau de mer n'est pas mesurée directement, elle est plutôt calculée à partir des mesures de température de l'eau, de sa salinité et de sa pression. Compte tenu de l'étroitesse de la gamme des changements de densité de l'eau dans l'océan, par commodité, la densité d'eau de mer est exprimée par la quantité sigma-t (σ_t), défini par $\sigma_t = \rho - 1000$.

La densité de l'eau de mer varie essentiellement en raison des changements de salinité et de température. *Un changement de la salinité reflète un changement dans la masse des sels dissous dans un volume donné d'eau.* Quand la salinité augmente, en raison de l'évaporation ou le rejet de sel lors de formation de la glace, la densité du fluide augmente aussi. *Un changement de température cause un changement de volume d'une quantité d'eau donnée.* Une augmentation de la température d'un fluide augmente la distance entre les molécules, augmente le volume d'un fluide et diminue sa densité (sa masse ne change pas). Un refroidissement réduira la distance entre les molécules, provoquant une diminution du volume d'un fluide et une augmentation de sa densité. La relation entre la température et la densité n'est pas linéaire, et la densité maximale de l'eau pure est atteinte aux alentours de 4° C (voir Denny, 2007; Garrison, 2007, ou tout autre manuel d'océanographie).

Densité, stratification et mélange

La stratification représente la disposition des masses d'eau en strates en fonction de leurs densité. La densité de l'eau augmente avec la profondeur, mais pas à un taux constant. Dans les régions de haute mer (à l'exception des mers polaires), la colonne d'eau est généralement caractérisée par trois couches distinctes: une couche supérieure de mélange (une couche d'eau chaude, moins dense à une température constante fonction de la profondeur), la thermocline (région où la température diminue et la densité augmente rapidement avec la profondeur) et une zone profonde d'eau dense plus froide où la densité augmente lentement avec la profondeur. Les variations de la salinité en haute mer ont généralement un effet plus faible sur la densité que n'en ont les variations de température. En d'autres termes, la densité de l'eau en haute mer est surtout contrôlée par la température. En revanche, dans les régions côtières touchées par un apport fluvial important et dans les zones polaires où la glace se forme et fond, la salinité joue un rôle important dans la détermination de la densité de l'eau et de la stratification.

La stratification forme une barrière efficace pour l'échange de nutriments et de gaz dissous entre la surface, constituée d'une couche de surface éclairée où le phytoplancton peut prospérer, et les fonds riches en éléments nutritifs. La stratification a donc des implications importantes dans les processus biologiques et biogéochimiques dans l'océan. Par exemple, les périodes de stratification accrue des océans ont été associées à une diminution de la biomasse de phytoplancton de surface, probablement due à la suppression du transport des nutriments vers le haut (Behrenfeld

et al., 2006; Doney, 2006). Dans les eaux côtières, où le flux qui règle la matière organique est élevé, des périodes prolongées de stratification peuvent conduire à une hypoxie (manque d'oxygène), qui entraîne une mortalité des poissons, des crabes et autres organismes marins.

Le mélange des couches stratifiées nécessite un travail. Par analogie, pensez aux difficultés que vous avez à mélanger l'huile et le vinaigre en agitant une bouteille de vinaigrette sans brassage énergique (par exemple, par le vent ou les vagues déferlantes) les échanges de gaz et d'éléments nutritifs entre la surface et les couches profondes se feront par diffusion moléculaire et par agitation locale par les organismes, qui sont des modes de transfert lents et inefficaces (Visser, 2007). L'énergie nécessaire pour le mélange est, au minimum, la différence de potentiel énergétique entre les fluides mélangés et les fluides stratifiés. (une partie de l'énergie, le plus souvent la plus grande, se perd en chaleur) . Par conséquent, plus la colonne d'eau est stratifiée, plus grande est l'énergie nécessaire au mélange vertical. (On peut demander aux étudiants avancés de calculer l'énergie requise, en utilisant le concept que le centre de gravité du fluide est plus élevé dans le liquide mélangé que dans le fluide stratifié [par exemple, Denny, 1993]).

La densité est d'une importance fondamentale en ce qui concerne la circulation océanique à grande échelle. Une augmentation de la densité de l'eau de surface par diminution de la température (refroidissement), ou par augmentation de la salinité (formation de glace ou évaporation), cause une instabilité gravitationnelle (i.e. une eau dense recouvrant une eau moins dense) et la circulation des eaux de surface vers le fond. Une fois qu'une masse d'eau s'enfonce à une profondeur à laquelle sa densité correspond à la densité ambiante, la masse circule à l'horizontale, le long de "surfaces" d'isodensité. Ce processus de formation d'une région d'eau dense et son immersion subséquente pilote la circulation thermohaline dans l'océan. Il est observé à basses latitudes (par exemple, dans le golfe d'Aqaba dans la mer Rouge, le golfe du Lion dans la mer Méditerranée) ainsi que dans les latitudes élevées (par exemple, formation des fonds marins dans l'Atlantique Nord). Dans la couche supérieure de mélange, un mélange convectif se produit en raison de la perte de chaleur au niveau des eaux de surface (densité motrices) et à cause du vent et des vagues (actionnés mécaniquement).

La densité est également fondamentale pour les processus ayant lieu dans les lacs. À l'approche de l'hiver dans les hautes latitudes, par exemple, les eaux des lacs sont refroidies par le haut. La température des eaux de surface diminue, leur densité augmente, et lorsque cette densité est supérieure à celles des eaux plus profondes, les eaux de surface s'écoulent vers le fond. L'eau plus chaude, moins dense sous la couche de surface remonte pour remplacer l'eau qui s'écoule vers le bas. Si la température de l'air reste basse, ces processus de refroidissement et de convection finiront par refroidir l'ensemble du lac à 4° C (la température du maximum de densité pour l'eau douce au niveau de la mer). Avec un refroidissement de la surface encore plus poussé, la densité des eaux de la couche supérieure va diminuer. Les eaux du lac se stratifient alors de façon stable, avec de l'eau plus dense au fond et les eaux plus froides, mais moins denses au-dessus. Lorsque la température des eaux de surface descend à 0° C, ces dernières commencent à geler. Si le refroidissement se poursuit, la couche gelée devient alors plus épaisse.

DESCRIPTION DES ACTIVITES

Les activités 1.1-1.3 servent à évaluer la densité, et les activités 1.4-1.6 mettent en évidence les liens avec les processus océaniques. Les activités 1.1-1.3 soulignent la relation entre la masse d'un objet, son volume, sa densité et son comportement lorsqu'il coule ou lorsqu'il flotte. Ces activités permettent également aux étudiants de s'entraîner à faire des mesures. Les mesures et les concepts connexes, comme la précision et l'exactitude ainsi que les concepts statistiques comme la moyenne et la déviation standard, peuvent être introduits pendant le cours et / ou donnés en devoirs. Dans les activités de 1.4-1.6, les étudiants examinent les relations entre la densité, la stratification et le mélange, et discuteront ensuite des applications aux processus océaniques. Les activités sont mises en place en postes de travail avant le cours (généralement de quatre à cinq postes par période de 90 minutes, en fonction du choix des activités, du niveau de difficulté et de la profondeur des discussions en relation avec le niveau des étudiants). Les étudiants sont invités à tourner entre les différents postes afin de faire leurs exercices. Pendant ce temps, les instructeurs se déplacent parmi les groupes et guident les étudiants en leur posant des questions. Les dernières 30 minutes de classe sont utilisées pour un résumé et une discussion.

ACTIVITÉ 1.1. EST-CE QUE ÇA FLOTTE (Figure 1.1)

Matériel

- Deux cubes de bois de même volume, l'un fait de balsa et l'autre de bois de gaïac (sciencekit.com)
- Une grande bille d'acier creuse (sciencekit.com)
- Une petite bille en Delrin ou autre sphère de plastique solide (disponible dans n'importe quelle quincaillerie)

- Un récipient rempli d'eau du robinet à température ambiante
- Une règle ou un pied à coulisse
- Une balance

Instructions pour les Étudiants

1. Faites une liste des propriétés auxquelles vous pensez pour déterminer si un objet coule ou flotte.
2. Soupesez les objets fournis et prédisez ceux qui vont flotter dans l'eau et ceux qui vont couler. Quel est le raisonnement derrière votre prédiction? Discutez de vos prédictions avec votre groupe.
3. Testez votre prédiction. Est-ce que vos observations appuient votre prédiction? Si non, comment pouvez-vous l'expliquer?
4. Sur la base de vos observations, comment pensez-vous revoir votre liste de propriétés de l'étape 1?
5. Déterminez la masse et le volume de chaque cube et de chaque balle. Pouvez-vous suggérer plus d'une méthode pour obtenir le volume des cubes et des boules? (Si le temps le permet: Comment les densités obtenues par les différentes méthodes se comparent entre elles?)
6. Quelle est la relation, le cas échéant, entre les masses des objets et le comportement flotte/coule observé? Quelle est la relation, le cas échéant, entre les volumes des objets et le comportement flotte/coule observé?
7. Calculer les densités des cubes, des balles, et de l'eau du robinet. Quelle est la relation, le cas échéant, entre les densités que vous avez calculées et le comportement flotte/coule observé?

Explication

Dans cette activité, les étudiants expérimentent avec quatre objets - deux types de cubes solides de bois, une boule métallique creuse, et une sphère en plastique. Nous utilisons deux types de bois de densités très différentes: le balsa, avec une fourchette de densité de 0,1-0,17 g cm^{-3} (le cube utilisé a une masse de 2,25 g et un volume de 16,7 cm^3, d'où une densité de 0,13 g cm^{-3}), et le bois de gaïac, avec une grande densité de 1,17-1,29 g cm^{-3} (nous employons un cube de masse égale à 19,6 g et dont le volume est égal à 15,2 cm^3, d'où une densité de 1,29 g cm^{-3}). Les densités de la petite balle en plastique et de la grande boule métallique creuse sont respectivement égales à 1,4 g cm^{-3} (masse de 1,5 g et volume de 1,07 cm^3) et à 0,14 g cm^{-3} (masse de 144 g et volume de 1035 cm^3). Parce que la densité de l'eau du robinet à température ambiante est d'environ 1 g cm^{-3}, le cube de balsa et la balle en métal vont flotter, et le cube de bois de gaïac et la boule de plastique vont couler. Cette activité

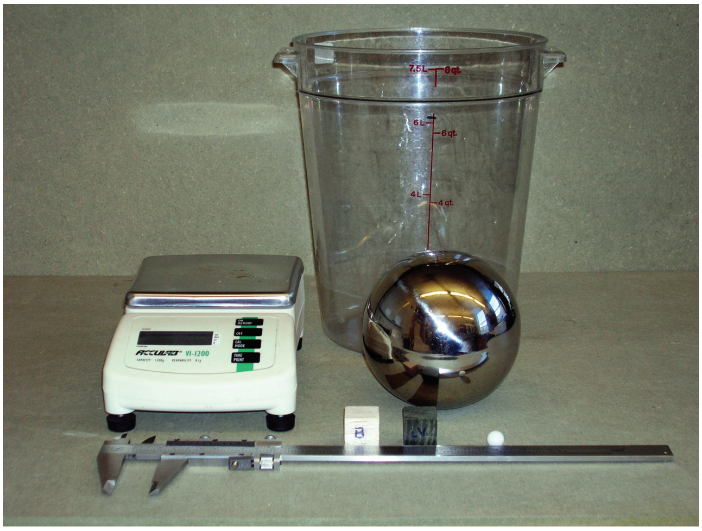

Figure 1.1. Matériel pour l'activité 1.1.

illustre deux points importants: (1) Le comportement flotte/coule d'un objet ne dépend pas de sa masse ou de son volume seulement, mais du rapport entre les deux, c'est-à-dire de sa densité. Ceci permet de souligner l'idée fausse potentiellement véhiculée par l'expression courante "les choses lourdes coulent, les choses légères flottent." (2) Le fait qu'un objet flotte ou coule ne dépendra pas seulement du matériau dont l'objet est fait (par exemple l'idée largement répandue d'après laquelle le bois flotte toujours). Si le temps le permet, une discussion sur les mesures de volume (basée sur les dimensions mesurées ou le déplacement de volume d'eau) peut être abordée, conduisant à la notion de flottabilité, qui est introduite au chapitre 3.

ACTIVITÉ 1.2. EST-CE QU'UNE CANETTE DE SODA PEUT FLOTTER? (Figure 1.2)

Matériel

- Une canette pleine de Mountain Dew et une canette pleine de Diet Mountain Dew
- Un grand récipient plein d'eau du robinet à température ambiante
- Un pied à coulisse ou une règle
- Une balance
- Un cylindre gradué de 2 litres

Instructions pour les Étudiants

1. Examiner les deux canettes. Listez leurs ressemblances et leurs différences.
2. Que pensez-vous de leur comportement flotte/coule lorsqu'elles seront placées dans le récipient rempli d'eau du robinet à température ambiante? Ecrivez votre raisonnement en motivant votre prédiction.

3. Placez les deux cannettes dans la bassine. Assurez-vous qu'aucune bulle ne s'accroche à la canette. Est-ce que votre observation est en accord avec votre prédiction? Comment pouvez-vous expliquer cette observation?
4. Comment pourriez-vous déterminer la densité de chaque boîte? Faites l'essai. Comment les densités des canettes se comparent-elles à la densité de l'eau du robinet?
5. Est-ce que vos mesures de densité sont en accord avec vos observations? Pourquoi pourrait-il y avoir une différence de densité entre les canettes et /ou entre les canettes et l'eau?

Explication

Lorsque les étudiants placent les deux canettes dans un baquet d'eau douce, la canette de soda ordinaire coule et la canette de soda «light» flotte (Figure 1.2). Les densités calculées des canettes de Mountain Dew et Diet Mountain Dew (incluant la boîte, le liquide et le gaz) sont égales à 1,024 g cm^{-3} et 0,998 g cm^{-3}, respectivement. La différence de densité est due aux différences de masse des édulcorants ajoutés à la canette normale et à la canette «light». Une canette de Mountain Dew ordinaire contient 46 g de sucre! Vos étudiants seront impressionnés si vous pesez à part 46 g de sucre afin de mettre en évidence la quantité de sucre ajoutée (voir à droite de la Figure 1.2). Les variations de cette activité sont disponibles sur Internet. Nous tenons à préciser qu'il existe des différences entre les différentes marques de soda et aussi entre les canettes au sein d'une même marque; dans certains cas, les canettes de boissons gazeuses «light» et celles de boissons gazeuses «normales» flotteront (ou couleront). Les instructeurs doivent toujours tester les boîtes avant le cours. Alternativement, un cas dans lequel une canette qui est censée flotter ne flotte pas, peut être transformé en un moment où les étudiants peuvent être mis au défi de tester leur compréhension. Cette activité est un exemple d'un cas discordant (voir la discussion à la p. 24). Puisque les canettes semblent similaires, les étudiants ne s'attendent pas à ce qu'elles aient un comportement flotte/coule différent dans l'eau. Au cours de l'activité, les élèves posent souvent la question de savoir comment mesurer le volume des canettes (par déplacement du volume ou par mesure des dimensions de la boîte puis en calculant le volume d'un cylindre). Nous les laissons choisir une approche et, comme chaque groupe utilise les mêmes boîtes de conserve, nous comparons les estimations de la densité obtenues par chacun. S'il y a suffisamment de temps, nous demandons à chaque groupe d'utiliser les deux approches et de comparer leurs estimations de densité. On pourrait développer davantage cette activité pour y inclure des estimations de la précision de chaque approche, ainsi que des discussions sur la mesure de précision et l'erreur de propagation.



Figure 1.2. Différences entre les densités et, donc différences de flottabilité entre une canette de soda ordinaire (à droite) et une canette de soda 'light' (à gauche).

ACTIVITÉ 1.3. DENSITÉS DES CROÛTES OCÉANIQUES ET CONTINENTALES (Figure 1.3)

Cette activité est dérivée d'une activité conçue par Donald F. Collins, Warren-Wilson College.

Matériel

- Des échantillons de roches de basalte (représentative de la croûte océanique) et de granite (représentative de la croûte continentale)
- Un récipient de débordement avec un bec et un cylindre de 50 ml, gradué pour récupérer l'eau déplacée (à défaut, une grande bouteille graduée ou un récipient avec des graduations peut faire l'affaire)
- Une balance

Instructions pour les Étudiants

1. Déterminer les densités des deux échantillons de roches. De quelle façon les densités du granit et du basalte diffèrent?
2. Le niveau moyen des terres émergées se trouve à 875 m au-dessus du niveau de la mer. La profondeur moyenne de l'océan est 3794 m au-dessous du niveau de la mer. Appliquer vos calculs de densité et vos connaissances sur la structure de la Terre pour expliquer cette grande différence d'altitude entre les continents et les bassins océaniques.
3. Dans les manuels scolaires, les densités de la croûte océanique et de la croûte continentale sont égales à 2,9-3,0 g cm^{-3} et 2.7-2.8 g cm^{-3}, respectivement. Comment ces valeurs se



Figure 1.3. Matériel pour l'activité 1.3.

comparent-elles à vos mesures? Si elles diffèrent, à quoi sont dues les différences entre les valeurs que vous avez obtenues et celles indiquées dans les manuels scolaires?

4. Étant donné que la masse de la Terre est 5,9742 x 10^{24} kg et que le rayon de la Terre est de 6378 km, calculer la densité de la planète. (Challenge: Comment peut-on déterminer la masse terrestre?). Comment la densité de la Terre se compare-t-elle à la densité des roches? Que concluez-vous sur la structure de la Terre?

Explication

Les densités des échantillons de roche utilisés sont de 2,8 g cm^{-3} pour le basalte (croûte océanique) et de 2,6 g cm^{-3} pour le granit (croûte continentale). Les deux types de croûte recouvrent le manteau terrestre qui lui est plus dense (3.3-5.7 g cm^{-3}). La croûte continentale est plus épaisse et moins dense que la croûte océanique moyenne en épaisseur additionnée de l'eau qui lui est sous-jacente. La croûte continentale flotte donc plus haut sur le manteau que ne le fait la croûte océanique. Au cours de l'activité et des discussions qui suivent en classe, nous mettons en évidence trois questions. La première concerne les mesures de volume de formes irrégulières par déplacement de l'eau. Ce concept sera plus tard lié à une leçon de suivi sur la flottabilité (chapitre 3). Ensuite, nous discutons de la question des mesures et de la variabilité qui leur est associée. Les étudiants en sciences sont habitués à voir dans les manuels scolaires des valeurs représentant des moyennes, souvent sans aucune information statistique sur les incertitudes associées ou leur variabilité naturelle. En outre, certains élèves pensent que s'ils n'obtiennent pas la valeur exacte fournie par le manuel scolaire, ils ont tort. À la fin du cours, nous comparons les différentes mesures de densité des groupes ainsi que leurs méthodes, et nous discutons ensuite des sources potentielles de variabilité dans les mesures et ce que les valeurs des manuels scolaires représentent effectivement. (Les concepts statistiques de moyennes et d'écart type peuvent également être abordés ici.) Enfin, nous soulignons les applications : comment les différences de densité et d'épaisseur des croûtes continentales et océaniques forment la topographie de la Terre, ainsi que leur relation aux processus de la tectonique des plaques. Pour le calcul de la masse moyenne de la Terre et de sa densité, voir Encadré 1.1.

ACTIVITÉ 1.4. EFFETS DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA SALINITÉ SUR LA DENSITÉ ET STRATIFICATION (Figure 1.4)

Matériel

- Une cuve rectangulaire avec une paroi de séparation amovible (de sciencekit.com)
- Un flacon de solution de sel préparée (environ 75 g de sel dissous dans 1 l d'eau: le sel kasher donne une solution claire alors qu'une solution à base de sel de table, à forte concentration, apparaît laiteuse)
- Des colorants alimentaires (deux couleurs différentes)
- De la glace
- Des gobelets

Instructions pour les Étudiants

1. Remplir un gobelet avec l'eau du robinet.
2. Mettre l'eau du gobelet dans un des deux compartiments de la cuve et l'eau de la bouteille de solution salée dans l'autre. Ajouter quelques gouttes d'un colorant alimentaire dans l'un des compartiments et quelques gouttes de l'autre colorant alimentaire dans l'autre compartiment. Que pensez-vous qu'il va se passer lorsque vous retirerez la paroi de séparation entre les deux compartiments? Expliquez votre raisonnement.
3. Mesurez ensuite les densités de l'eau du robinet à température ambiante et celle de la solution salée.
4. Testez votre prédiction en ôtant la paroi de séparation de la cuve. Que se passe-t-il? Vos observations sont-elles en accord avec les densités que vous avez mesurées?
5. Videz le bac et remplissez un gobelet avec de l'eau chaude et un autre, avec de l'eau glacée. Ajoutez dans chaque gobelet quelques gouttes de colorant alimentaire (une couleur pour chaque récipient).
6. Placez l'eau chaude dans l'un des compartiments du bac, et l'eau glacée de l'autre. Répétez les étapes 3 à 5. Après avoir

ENCADRÉ 1.1. OBTENTION DE LA MASSE ET LA DENSITÉ DE LA TERRE

La masse de la Terre peut être calculée à partir des lois de Newton:

1. La loi de Newton de la gravitation universelle stipule que la force (force d'attraction) que deux corps exercent l'un sur l'autre est directement proportionnelle au produit de leurs masses (m_1, m_2) et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (L): $F = Gm_1m_2 / L^2$, où G est la constante de gravitation ($G = 6{,}7 \times 10^{-11}$N m^2 kg^{-2}). Si nous supposons que le corps est proche de la surface de la Terre, alors le rayon de la planète peut être utilisé comme distance entre le corps et la Terre.
2. La deuxième loi de Newton dit que la force d'attraction d'un corps à la terre est égale à sa masse (m) multipliée par l'accélération de pesanteur (g): $F = mg$, où, à la surface de la Terre, $g = 980$ cm s^{-2} (g lui-même peut être calculé, par exemple, à partie de la période d'un pendule).

Soient m_1 la masse terrestre et m_2 la masse d'un corps:
$F = m_2 g = Gm_1m_2 / L^2$. La masse terrestre est donc $m_1 = g L^2 / G \approx 6 \times 10^{24}$ kg. En le divisant par le volume de la Terre ($^4/_3\pi r^3$, où r est le rayon de la Terre; ici nous avons utilisé une moyenne de 6373 km), on obtient la densité de la Terre (5515 kg m^{-3} ou 5,515 g cm^{-3}).

enlevé la paroi de séparation et après observation du nouvel équilibre dans le bac, plongez le bout de vos doigts à la surface du fluide et bougez lentement votre main vers le fond du bac. Ressentez-vous la variation de température?

7. Comment les effets du changement climatique, tels le réchauffement ou la fonte des glaciers, sont-ils susceptibles d'affecter la structure verticale d'une colonne d'eau ? Discutez des différents scénarios possibles avec votre groupe (une alternative est de laisser cette question dans le cadre d'un travail à domicile).

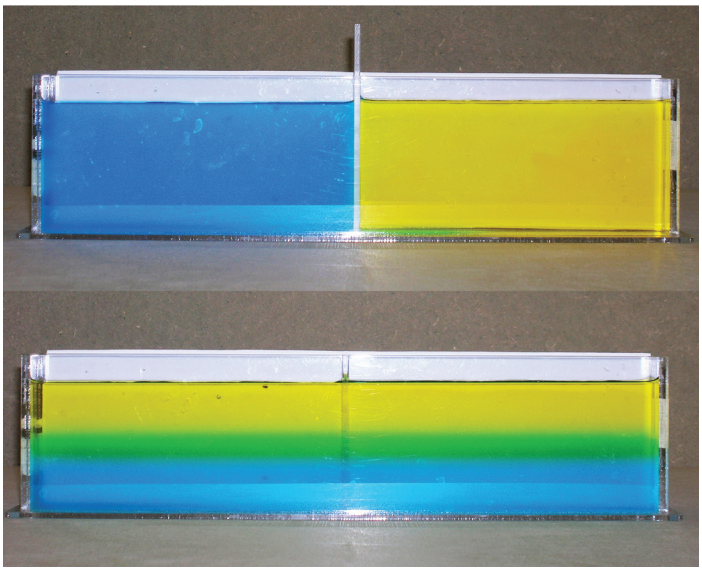

Figure 1.4. cuve avant (photo du dessus) et après avoir enlevé la paroi de séparation (photo du bas).

Explication

Cette activité démontre que les fluides s'ordonnent en couches, selon leur densité. Les deux « masses d'eau » (Figure 1.4) – salée (bleu) par rapport à l'eau froide (jaune), ou l'eau froide (bleu) par rapport à l'eau chaude (jaune) – sont initialement séparées par la paroi de division du bac. Quand cette paroi est ôtée, l'eau la plus dense (salée ou froide – en bleu) plonge vers le fond du récipient est l'eau de densité plus faible (fraîche ou chaude – en jaune) flotte au-dessus, formant ainsi une colonne stratifiée. Dans ce processus, une couche intermédiaire se forme dans le bac (dont l'origine est discutée plus en détail dans le chapitre 5, Ondes gravitationnelles).

ACTIVITE 1.5. EFFET DE LA STRATIFICATION D'UN MÉLANGE (Figure 1.5)

Cette activité est basée sur une démonstration transmise par Peter Franks, Université de Californie, San Diego. Voir « Franks and Franks » (2009) pour plus de détails concernant la simulation physique.

Matériel :

- Un bac contenant de l'eau du robinet
- Un bac contenant un fluide stratifié*
- Un sèche-cheveux
- Deux colorants alimentaires de couleur différente
- De longues pipettes

* Pour préparer un bac avec deux couches de fluides stratifiés, remplissez à moitié ou au trois-quarts le bac, avec une solution d'eau très salée (voir Activité 1.4). Placez une fine couche de mousse (de la même grandeur que le récipient) au-dessus de l'eau, et versez délicatement de l'eau chaude par-dessus la mousse. Ensuite, enlevez la mousse en prenant soin de ne pas remuer ou mélanger les fluides. Pour d'autres techniques, voir « Franks and Franks » (2009).

Instructions aux Étudiants

1. Prédire dans quel bac un colorant déposé en surface aura le plus de chance de se répartir partout dans le récipient.
2. Dans le bac sans colonne d'eau stratifiée, utilisez une longue pipette pour injecter délicatement quelques gouttes de colorant alimentaire à la surface de l'eau. Utilisez ensuite le sèche-cheveux pour générer un « vent » à peu près parallèle à la surface du fluide, et observez la manière dont le colorant se mélange.
3. Avec le bac contenant les fluides en deux couches, utilisez la longue pipette pour injecter délicatement quelques gouttes de colorant à la surface de l'eau et quelques gouttes d'un autre colorant au fond du récipient. En utilisant le sèche-cheveux, générez un vent similaire à celui de l'étape 2. Comparez vos observations avec vos observations du bac sans colonne d'eau stratifiée.
4. A la lumière de vos observations, prédisez et discutez avec votre groupe de quelques effets potentiels du réchauffement climatique sur la stratification et le mélange des eaux au sein des océans et des lacs. Quelles peuvent être les conséquences pour les organismes marins ?

Explication

Dans la colonne d'eau non-stratifiée (Figure 1.5, côté gauche), le colorant rouge déposé à la surface du fluide coule parce que sa densité est légèrement plus élevée que celle de l'eau (Figure 1.5, en haut, à gauche). Après une courte période d'exposition à un stress de surface (le « vent » généré par le sèche-cheveux), le colorant se répartit à travers tout le récipient (Figure 1.5, en bas, à gauche). Dans le bac de fluides stratifiés (côté droit), la pycnocline, c'est-à-dire la région où la variation de densité est la plus grande, forme une barrière effective au mélange (Figure 1.5, en haut, à droite). Une énergie supplémentaire est requise pour mélanger les deux couches, et le vent généré par le sèche-cheveux n'est pas suffisant pour mélanger l'entièreté de la colonne d'eau. Résultat : le colorant rouge ne se mélange qu'au sein de la première couche, de manière analogue à ce qui se produit au niveau de la couche supérieure des océans et des lacs (Figure 1.5, en bas, à droite). Les calculs de l'énergie nécessaire pour augmenter la profondeur de la pycnocline par mélange, en élevant le centre de gravité du fluide, peuvent être utilisés en conjonction avec cette activité (voir Denny, 2007).

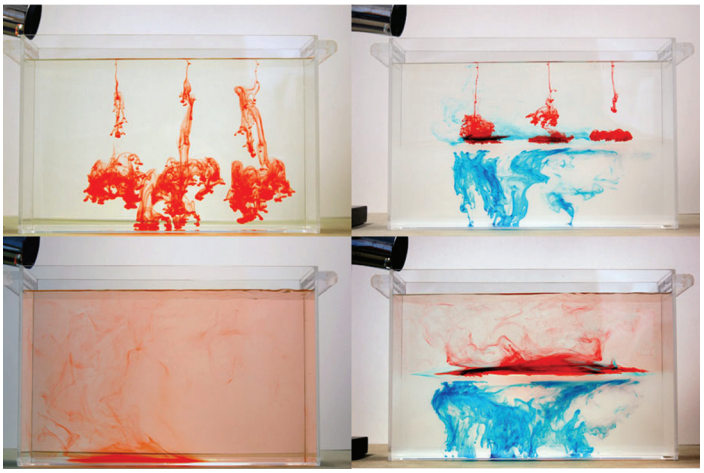

Figure 1.5. Bacs avec du colorant avant (photo du dessus) et après (photo du bas) l'application d'une force mécanique (simulée par un sèche-cheveux orienté parallèlement à la surface). Côté gauche : bac contenant un fluide non stratifié ; côté droit, bac contenant un fluide de densité stratifiée.

ACTIVITÉ 1.6. CONVECTION SOUS LA GLACE (Figure 1.6)

Matériel

- Au minimum quatre blocs de glace colorée (ajoutez les colorants alimentaires à l'eau et placez la ensuite au congélateur dans des récipients adéquats).
- Deux grands récipients transparents – l'un rempli avec de l'eau du robinet et l'autre, avec de l'eau salée (les deux à température ambiante)*.

* Il est nécessaire de remplacer l'eau des bacs à chaque fois qu'un nouveau groupe arrive. Comme la glace fond, les colorants se répandent dans l'eau et après un certain temps, il devient difficile d'observer le mode d'écoulement.

Instructions pour les étudiants

1. Placez un bloc de glace colorée dans le bac rempli au préalable d'eau du robinet. Pendant que la glace fond, observez et expliquez le comportement des fluides.
2. Placez un autre bloc de glace colorée dans le bac rempli d'eau salée. Pendant que la glace fond, observez et expliquez le comportement des fluides. Comparez ces observations à celles de l'étape 1.

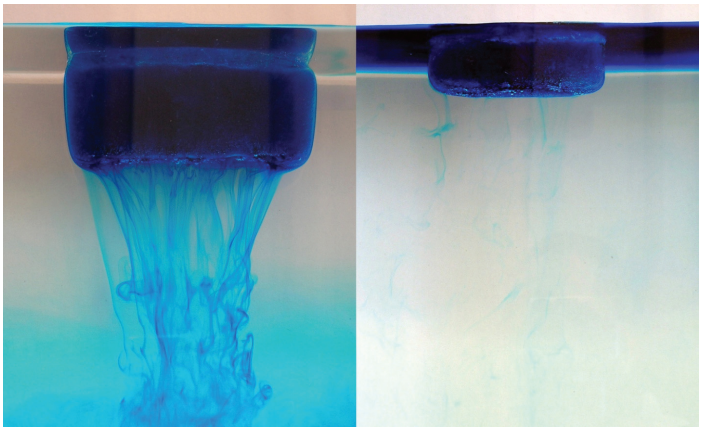

Figure 1.6. Convection associée à la fonte d'un bloc de glace colorée dans de l'eau du robinet (gauche) et dans de l'eau salée (droite).

Remarque au professeur: Il peut être demandé aux étudiants avancés d'observer à la fois les comportements des fluides lorsque la glace est proche des parois du récipient et lorsqu'elle est au centre du bac, et relier ces observations aux scénarios océaniques courants (par exemple, les cheminées de convection dans un océan ouvert par rapport aux mouvements de convection à proximité des côtes).

Explication

Figure 1.6, côté gauche : Dans l'eau du robinet, le bloc de glace flotte parce que la densité de la glace est inférieure à celle de l'eau fraîche. Mais lorsque la glace fond, par contre, l'eau froide et colorée coule vers le fond parce qu'elle est plus dense que l'eau du robinet. L'eau plus chaude située au fond est donc déplacée vers le haut, provoquant un courant de convection rendu visible grâce aux colorants. La glace qui fond au centre du récipient est analogue aux cheminées de convection formées dans les océans ouverts, alors que la glace qui fond près des parois correspond à une cheminée proche d'une côte continentale (près d'une masse de terre). De telles cheminées dans les océans, créées et entretenues par des processus convectifs, apparaissent comme des colonnes d'eau mélangées qui s'écoulent vers le fond. Sous des conditions océaniques et météorologiques données, la convection en eau ouverte tend à entraîner plus d'eaux avoisinantes que ne le ferait une convection proche des côtes. Pour cette raison, le cas de l'océan ouvert a pour conséquence une eau descendante de densité plus faible.

Figure 1.6, côté droit : Le bloc de glace flotte en eau salée, et donc dense. Alors que la glace fond, seule une petite quantité de colorant coule car la densité de l'eau salée est supérieure que celle de l'eau à peine fondue. La majorité de l'eau fondue va donc s'accumuler à la surface de la couche, au-dessus de la couche salée plus dense.

ACTIVITÉ SUPPLÉMENTAIRE (Figure 1.7)

Si le temps le permet, la compréhension par les étudiants du concept de densité peut être renforcé à la fin de la leçon, en leur donnant un thermomètre de Galilée (Figure 1.7 . peu coûteux et facilement accessible sur internet), un récipient d'eau chaude, un récipient d'eau froide, et en leur demandant d'expliquer le fonctionnement du thermomètre. Un thermomètre de Galilée est constitué d'un tube de verre scellé contenant un fluide limpide et calibré, dans lequel flottent des boules de verre auxquelles sont attachées des plaques métalliques. Les boules, ayant chacune une densité légèrement différente, sont en suspension dans le fluide transparent. Elles sont scellées et possèdent donc chacune un volume, une masse et donc une densité constants. Ce qui change donc en cas de chauffage ou de refroidissement, c'est la densité du fluide qui les entoure. Le changement relatif de densité entre les boules de verre et le fluide provoque leur montée ou leur descente, et les réorganise en fonction de l'équilibre des densités. Habituellement, les boules sont séparées en deux groupes, l'un proche du fond, et l'autre, proche du sommet de la colonne. La température est donc lue à partir des disques de métal attachés aux boules : la lecture du disque de la boule la plus basse du groupe supérieur indique la température. Notons cependant que cela nécessite un temps assez long pour



Figure 1.7. Thermomètre de Galilée.

que le thermomètre de Galilée enregistre un changement de température, s'il passe d'un bain chaud à un bain froid, vice-versa, à cause de la faible allure à laquelle le liquide interne change de température. Cet équilibre lent est particulièrement prononcé quand le thermomètre est placé dans un bain glacé, parce que le liquide froid (plus dense) reste majoritairement au fond. Pencher périodiquement le thermomètre peut réduire le temps d'attente. Pour une démonstration rapide, il est préférable de comparer deux thermomètres, l'un placé dans un bain d'eau chaude, l'autre dans un bain d'eau froide.

REFERENCES

Behrenfeld, M.J., R. O'Malley, D.Siegel, C. McClain, J. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier, and E. Boss. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. Nature 444:752–755.

Denny, M.W. 1993. Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.

Denny, M. 2007. How the Ocean Works: An Introduction to Oceanography. Princeton University Press, Princeton, NJ, 344 pp.

Doney, S. 2006. Plankton in a warmer world. Nature 444:695–696.

Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. Oceanography 22(1):228–233. Available online at: http://www.tos.org/hands-on/index.html (accessed August 4, 2009).

Garrison, T.S. 2007. Oceanography: An Invitation to Marine Science. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.

Visser, A. 2007. Biomixing of the oceans? Science 316:838.

AUTRES RESSOURCES

http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm. Ce site web climat-océan COSEE-OS donne accès à des images de profiles de densité et de circulation thermohaline, des vidéos sur la convection océanique, une collection d'activité pratiques, ainsi que des liens vers des concepts connexes.

Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. Project Earth Science: Physical Oceanography. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.

ENCOURAGER LES ETUDIANTS A POSER DES QUESTIONS : UNE PROMENADE DANS UN ENVIRONNEMENT RICHE

BASÉ SUR WELLER, 1998

Poser des questions fait partie intégrante de l'investigation scientifique (National Research Council, 2000) et est très intéressant au niveau éducatif. The National Research Council (2000p . 29) reconnaît l'aptitude à poser des questions orientées de manière scientifique comme une des 5 caractéristiques essentielles à la investigation en classe. Les questions des élèves peuvent nous fournir de nombreuses indications sur leur compréhension et leur raisonnement et nous révéler leurs idées fausses. Le fait de poser des questions permet à l'élève de stimuler sa curiosité et sa motivation, cela l'aide à développer son esprit critique et à penser librement et cela fait de lui un acteur de son apprentissage. Cependant, dans le système classique, les élèves posent rarement des questions ; c'est surtout le professeur qui pose les questions. Lorsque nous avons demandé aux jeunes étudiants pourquoi ils posaient rarement des questions en classe, les deux réponses les plus courantes ont été : (1) la peur de paraître stupide et (2) une ambiance de classe peu propice à poser des questions.

De nombreux étudiants ont ajouté que leur expérience scolaire les avait amenés à intégrer que ce que l'on attendait d'eux en tant qu'élèves était d'être présent en classe, de prendre note, de faire leurs devoirs et de passer les examens. L'accent n'avait pas été mis sur leur compétence à poser des questions.

Nous décrivons ici l'approche que nous avons mise en place pour encourager les étudiants à poser des questions. Dans la première période d'un cours, nous emmenons les étudiants en promenade dans un environnement « riche ». Le but de la promenade est de les confronter à un objet stimulant qui va les inciter à se poser spontanément des questions. Cette approche est inspirée d'une démarche dans une école primaire qui essayait d'obtenir que les enfants posent des questions (Jelly, 2001).

Comme environnement « riche », nous avons choisi l'installation de pisciculture de l'Université du Maine, dans laquelle des poissons tropicaux sont élevés dans des buts scientifiques et commerciaux. Nous ne disons rien à propos de cet environnement avant la promenade. Nous leur donnons juste comme consigne de noter les questions qui leur viennent à l'esprit quand ils explorent l'environnement, en se focalisant sur des questions qui les intéressent vraiment (plutôt que des questions qui pourraient figurer dans des manuels scolaires). Après 30 minutes d'exploration libre, chaque étudiant doit choisir de 3 à 5 questions pour constituer une liste des questions de la classe. La liste peut être écrite électroniquement ou manuellement sur un tableau ou un écran de telle sorte que les élèves puissent visuellement se rendre compte de la quantité, de la qualité et de la diversité de leurs questions. Des exemples de questions posées durant cette promenade étaient : « les poissons jouent-ils ? », « est-ce que les algues favorisent ou inhibent la reproduction ? », « comment transportez-vous les poissons tropicaux dans des conditions météo extrêmes, et quelle est la mortalité pendant cette opération ? »

Ensuite nous demandons aux étudiants de former des équipes, et chaque équipe doit établir des catégories de questions. Un délégué de chaque équipe explique à la classe les critères pour le choix des catégories. Cette manière de travailler en classe encourage les étudiants à prendre sérieusement en considération chacune des questions, et cela permet de laisser tomber des catégories qui ont été choisies par trop peu d'élèves. Par exemple, en 2007, les catégories développées par les 3 petits groupes étaient les suivants : Groupe A—biologie, installation, environnement, business; Groupe B—environnement, cycle de vie des poissons, installation, marketing; Groupe C—exploration, biologie/écosystème, technique, installation, economie. C'était souvent la première fois que les étudiants devaient établir des catégories à partir de données brutes, sans aucun conseil donné par le professeur.

Pour conclure, nous avons demandé aux étudiants de partager leurs points de vue sur la façon dont ils pensent que leur promenade, leur questionnement et leur catégorisation pouvaient ressembler à ce que les scientifiques font dans la première phase de leur travail de recherche. Nous avons également demandé aux étudiants de décrire ce qu'ils croient être une bonne question scientifique. Nous avons fait de ce sujet

un sujet de leçon. Les étudiants répondent souvent qu'une bonne question scientifique doit être aussi précise que possible et qu'elle ne doit pas inclure des aspects non scientifiques comme la foi, la politique et l'éthique. Une bonne question en science devrait être (1) aussi précise que possible, isolant l'essentiel du problème. Elle doit amener (2) à envisager plusieurs hypothèses pour y répondre excluant (3) les pseudosciences (Derry,1999 ;Sagan,1996) ; et (4) ce sur quoi on ne peut pas obtenir d'informations (Sagan, 1996). Pour aller plus loin dans la discussion concernant ces aspects du questionnement scientifique, nous recommandons Derry (1999), Sagan (1996, chapitre 12, pages 201-218), et Atkins (2003, pages 3-4). Finalement, nous discutons de la puissance de questionnement dans l'apprentissage et nous demandons aux étudiants de faire part de leurs impressions sur le fait de poser des questions au cours. Nous saisissons cette opportunité pour rappeler aux étudiants que le questionnement fera intégralement partie du cours.

Cet exercice donne le ton de notre cours, augmente l'aisance des étudiants à poser des questions, et finalement améliore l'étude. Pour poursuivre dans cette voie, on peut demander aux étudiants de rechercher les réponses à leurs propres questions à titre de devoir ou de travail de fin de cycle. L'exercice pourrait également être mis en place au milieu d'une période pour mobiliser l'intérêt des étudiants lors de l'introduction d'une nouvelle matière. Notez bien qu'un environnement « riche » n'a pas besoin d'être une installation spécialisée. Des démonstrations en classe, des clips vidéo, des simulations sur ordinateur, et/ou des photos ou images peuvent parfaitement servir pour stimuler le questionnement des étudiants.

REFERENCES

Atkins, P. 2003. *Galileo's Finger: The Ten Great Ideas of Science*. Oxford University Press, 400 pp.

Derry, G.N. 1999. *What Science Is and How It Works*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 328 pp.

Jelly, S. 2001. Helping children raise questions—and answering them. Pp. 36–47 in *Primary Science: Taking the Plunge*. W. Harlen, ed, Heinemann, London, UK.

National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.

Sagan, C. 1996. *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*. Ballantine Books, New York, NY, 480 pp.

Weller, H.G. 1998. A running inquiry—Nature asked the questions during this jog. *Journal of College Science Teaching* 27:389–392.

CHAPITRE 2. PRESSION

OBJECTIF

Cette série d'activités a pour objectif d'aider les étudiants dans leur compréhension du concept de pression au sein des fluides. Appréhender le paramètre de pression aux travers d'expressions mathématiques (par exemple l'équation hydrostatique ou l'équation de Bernoulli) ne permettra pas d'intéresser les étudiants rétifs aux mathématiques. Pour cette raison, nous utilisons une série d'activités qui permettent aux étudiants d'examiner le concept de pression sous différents angles. Nous commençons par revisiter la définition physique de la pression et par introduire des exemples de la vie quotidienne. Cette structure offre aux étudiants un point d'entrée familier à un concept souvent mal compris et aide les étudiants motivés par un apprentissage plus approprié. Au moyen d'activités pratiques, basées sur l'enquête, nous illustrons le concept de pression hydrostatique, la compressibilité des gaz sous pression (entre autres, la loi de Boyle), et la pression des fluides dynamiques (par exemple, le principe de Bernoulli). Nous mettrons en évidence la signification de ces principes dans le processus des océans, depuis la circulation océanique jusqu'à l'évolution de l'adaptation habituellement observée des organismes marins.

CONTEXT ET NOTIONS DE BASE

La pression (P) est définie comme la force (F) appliquée à une surface (A), dans une direction perpendiculaire à cette aire :

$$P = \frac{F}{A}.$$

Donc, la pression dépend de l'aire sur laquelle une force donnée est distribuée. La pression est un scalaire, et n'est donc pas caractérisée par une direction. Une force directionnelle d'une haute vers une basse pression est appliquée sur un objet quand la pression varie au sein de cet objet. L'unité de pression communément utilisée est le Pascal (Pa), où 1 Pa = 1 N m^{-2} = 1 kg m^{-1} s^{-2} (N=Newton). Des unités telles que le pound par pouce carré (psi), le bar ou encore l'atmosphère standard (atm) sont également utilisées dans les applications océaniques et atmosphériques.

De nombreux phénomènes rencontrés quotidiennement sont associés au concept de pression. Parmi eux, le vent, la différence de performance entre un couteau tranchant et un couteau mal aiguisé, ou encore, boire à la paille. La pression atmosphérique au niveau de la mer est approximativement de 10^5 Pa. Nos corps ne s'écroulent pas sous cette pression car aucune force nette n'est appliquée sur eux (une pression interne égale existe à l'intérieur du corps). Nos sens ne détectent donc aucune pression absolue, mais ils détectent les changements de pression (par exemple, le changement de pression généré à l'intérieur d'une cavité pleine de gaz lorsque nous plongeons ou volons).

Même si les étudiants ne le réalisent pas, la pression varie de position en position, aussi bien dans les océans que dans l'atmosphère. Les variations spatiales en pression sont les forces conductrices des courants océaniques et des vents. Par exemple, les alizés soufflent de la zone de haute pression normalement stable au-dessus du Pacifique Est à la zone de basse pression sur le Pacifique occidental. Cependant, pour des raisons encore mal connues, cette configuration de pression change tous les trois à huit ans, provoquant l'affaiblissement des alizés puis leur changement de direction. Cette variation de pression atmosphérique est appelée Oscillation australe. Les changements du Pacifique équatorial dans la circulation des océans associés aux oscillations australes sont à l'origine du phénomène El Niño, qui a de sérieuses conséquences mondiales.

La pression dans les océans augmente pratiquement linéairement avec la profondeur. Les différents organismes marins sont adaptés pour vivre à une profondeur bien définie. Les cavités remplies de gaz à l'intérieur des animaux et des autres organismes sont sous pression (voir ci-dessous). En plus, la solubilité des gaz est affectée par la pression, avec des conséquences importantes pour la physiologie de plongée, à la fois des organismes humains et marins. La pression n'engendre pas seulement des contraintes sur les organismes marins, mais elle est également très utile. Par exemple, les changements de pression associés aux écoulements de l'eau sur les monticules et autres reliefs en saillie améliorent la vitesse d'écoulement, et donc l'approvisionnement en nourriture des mangeurs en suspension (par exemple, les bernacles) ainsi que l'oxygénation des eaux dans les terriers d'organismes benthiques (voir ci-dessous).

Pression hydrostatique (fluides au repos)

La pression à une profondeur donnée dans l'océan est le résultat du poids exercé à la fois par les colonnes d'eau et d'air du dessus. Cette pression, dans un fluide au repos, est appelée « pression statique » ou « pression hydrostatique ». La pression hydrostatique (P_h) est une fonction de la densité d'un fluide et

ENCADRÉ 2.1. CALCUL DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE

Supposons une colonne d'eau avec une section transversale A, et de profondeur (hauteur) z. Le volume de la colonne d'eau est Az. La force que cette colonne exerce sur une section donnée en un point donné est F = poids = mg, où m est la masse d'eau au-dessus la section transversale et g est l'accélération gravitationnelle. La masse peut être aisément exprimée en terme de densité (supposée constante) et de volume d'eau : $m = \rho V$. Donc, $F = \rho Vg$. La force par unité de surface (la pression P) est, par conséquent, $P = \rho Vg/A = \rho(Az)g/A = \rho gz$. Si la densité varie avec la profondeur (ce type de changement est généralement inférieur à 1% dans l'océan), la densité moyenne est utilisée plutôt que la densité ponctuelle (elle est calculée en intégrant la densité par rapport à la profondeur et en divisant par la profondeur de la colonne d'eau). Pour évaluer la pression dans les fluides, l'équation d'hydrostatique est très utile. Des appareils tels que les manomètres (Activité 2.4) sont utilisés pour mesurer la pression relative par rapport à une pression de référence (généralement la pression atmosphérique).

de la hauteur de la colonne du fluide (profondeur). La relation est définie par l'équation hydrostatique $P = \rho gz$, où ρ représente la densité moyenne, g l'accélération gravitationnelle, et z la hauteur de la colonne d'eau (voir Encadré 2.1 pour la dérivation). L'équation hydrostatique est centrale dans l'étude de la circulation océanique. Par exemple, les courants géostrophiques (tels que le Gulf Stream) sont déterminés par l'équilibre entre le gradient horizontal de pression et l'accélération de Coriolis (une accélération résultant de la rotation de la Terre). Les différences de pression hydrostatique entre deux positions résultent d'une force par unité de volume exercée sur le fluide (air ou eau) agissant de la zone de haute pression vers la zone de basse pression. A cause de la rotation de la Terre, le mouvement de fluide résultant n'est pas orienté de la haute vers la basse pression (comme le fluide ferait dans un environnement non-rotationnel), mais bien le long des lignes de pression constante. A l'équateur, cependant, où l'effet Coriolis est faible, les vents et les courants sont pour la plupart sous gradient de pression.

Il est impossible de mesurer de façon fiable les changements horizontaux de pression le long des surfaces de profondeurs fixes dans l'océan parce que la pression et la profondeur sont redimensionnées en fonction de la même coordonnée verticale (au premier ordre). Par contre les océanographes utilisent la méthode des hauteurs dynamiques dans laquelle deux points de référence de pression égale sont choisis et les densités de profondeur intégrées des colonnes d'eau au-dessus de ces points de référence sont calculées et comparées. On suppose que ces deux points de référence sont localisés sur une surface isobare (une surface imaginaire où la pression est la même partout), et pour cette raison, il n'y a pas de mouvement horizontal d'eau à cette profondeur choisie. Si $\rho_1 \neq \rho_2$ (où ρ_1 et ρ_2 sont les densités des profondeurs intégrées respectivement aux points de références 1 et 2), alors z_1 et z_2 (les hauteurs des colonnes d'eau au-dessus des points 1 et 2) doivent être différents. Les différences de hauteur des colonnes d'eau au-dessus des profondeurs de référence sont utilisées pour calculer les pentes de la surface des mers. Par exemple, à travers le Gulf Stream (environ 70 km de large), la hauteur des surfaces baisse de plus d'un mètre. La pente calculée est proportionnelle au gradient de pression qui est requis pour l'estimation de la vitesse des courants géostrophiques (par exemple, Figure 10.7 sur http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter10/chapter10_04.htm). Aujourd'hui, il est possible de déterminer les pentes des surfaces marines en utilisant l'altimétrie par satellite.

Deux autres points importants peuvent être mentionnés par rapport à la pression hydrostatique. Le premier concerne la transmission de pression à travers le fluide. La pression qui est appliquée d'un côté du fluide est transmise à travers l'entièreté de celui-ci (connu sous le nom de Principe de Pascal). L'information sur l'apparition des changements de pression à l'intérieur du fluide se propagent par onde sonore, à la vitesse du son (1500 m s^{-1}), ce qui à l'échelle de notre laboratoire (cas un plongeur cartésien dans le Chapitre 3) paraît instantané. Si vous prenez un ballon plein d'eau et que vous l'immergez dans l'eau,

la pression hydrostatique externe au ballon égale la pression à l'intérieur de celui-ci, et le ballon maintient sa forme et sa taille. Ce principe explique pourquoi vous ne sentez pas la pression à l'intérieur de votre corps (sauf pour les cavités d'air ; voir ci-dessous) quand vous plongez. La transmission de pression par les fluides est le principe utilisé dans les appareils hydrauliques (par exemple les élévateurs de voiture dans les stations services, les machines de construction utilisées pour hisser des charges lourdes).

Compressibilité des gaz sous pression

Dans l'océan, la pression augmente à un taux de 1atm (10^5 Pa) par 10m. Les organismes qui vivent ou plongent à de grandes profondeurs sont donc soumis à des forces de compression élevées dues au poids de la colonne d'eau au-dessus d'eux. Une des différences fondamentales entre l'eau et les gaz est que l'eau est un fluide hautement incompressible tandis que les gaz sont compressibles. Le volume d'une quantité donnée de gaz est inversement proportionnel à sa pression interne (connu sous le nom de Loi de Boyle) ; si la pression double, le volume du gaz diminue de moitié. Parce que le corps humain est essentiellement constitué d'eau, il ne se comprime pas de façon significative lorsqu'il plonge dans l'eau. La pression ne peut être ressentie que dans des cavités où l'air est enfermé comme les sinus, les oreilles et les poumons. C'est pourquoi nos oreilles peuvent être douloureuses en plongeant, même dans une piscine de quelques mètres de profondeur. Les mammifères marins qui plongent à de grandes profondeurs ont développé des mécanismes d'adaptation pour éviter les dommages potentiels causés aux cavités aériennes comme les poumons. La loi de Boyle illustre également le danger que constitue la détente des gaz lorsque la pression diminue en remontant vers les profondeurs moins élevées. Lorsqu'un plongeur respire de l'air comprimé à une profondeur de 10 m (où la pression totale est de 2 atm) et remonte ensuite à la surface tout en retenant sa respiration, le volume d'air dans ses poumons va doubler. Une partie de l'air doit être expiré sinon le poumon pourrait être endommagé. Des dommages similaires se produiraient aux vessies natatoires de nombreuses espèces de poissons, s'ils remontaient trop vite. C'est pourquoi, certains poissons des fonds marins sont limités dans leurs mouvements verticaux, et ils meurent lorsqu'ils sont remontés par des pêcheurs. D'autres espèces ont développé des moyens pour vider rapidement leurs vessies natatoires et ne sont donc pas limitées dans leurs mouvements verticaux.

ENCADRÉ 2.2. PRINCIPE DE BERNOULLI

Supposons que vous ayez un fluide incompressible se déplaçant dans un flux constant et continu, où les forces de viscosité sont supposées être négligeables (pas de pertes par frottement). Plusieurs formes d'énergie sont en jeu: (1) l'énergie potentielle gravitationnelle associée à la masse du fluide, $E_p = mgz$, (2) l'énergie potentielle de compression du fluide PV, et (3) l'énergie cinétique mécanique qui est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide, $E_k = mv^2/2$. L'énergie totale est la somme de toutes ces formes d'énergies. Par le principe de conservation de l'énergie, si aucun travail n'est effectué sur le fluide, l'énergie totale en deux points le long du trajet de l'écoulement est le même:

$$m_1 \frac{v_1^2}{2} + m_1 gz + P_1 V_1 = m_2 \frac{v_2^2}{2} + m_2 gz + P_2 V_2 .$$

La profondeur, z, et la densité sont les mêmes le long de l'écoulement du fluide (même fluide circulant dans un tuyau horizontal), on peut annuler le terme d'énergie potentielle gravitationnelle. En divisant les deux membres par le volume (car le fluide est incompressible):

$$\rho_1 \frac{v_1^2}{2} + P_1 = \rho_2 \frac{v_2^2}{2} + P_2 .$$

Ainsi, les changements de vitesse le long du flux (accélération) sont associés aux changements de pression.

Le principe de Bernoulli a des implications importantes dans les calculs de portance aérodynamique, il est utilisé pour mesurer la vitesse des avions (le tube de Pitot vu sur le côté du poste de pilotage de petits avions à réaction), et il permet à des véhicules poussés par le vent de se déplacer plus vite que le vent qui les propulse.

Dans la discussion ci-dessus, nous avons supposé la température constante. Il peut être utile de demander aux élèves comment des variations de température influencent les variations de volume d'un objet immergé. La loi des Gaz Parfaits énonce que pour un volume donné, la pression augmente en fonction de la température (une discussion sur l'énergie cinétique moléculaire serait opportune ici). Toutefois, dans l'océan, la variation de température en fonction de la profondeur est négligeable (environ 10% en Kelvin sur la profondeur totale des océans) par rapport à la variation de pression en fonction de la profondeur (1 atm tous les 10 m). Les variations de volume dans les cavités remplies de gaz en fonction de la profondeur sont donc essentiellement dues aux variations de la pression.

Accélération des Fluides : Principe de Bernoulli

Lorsque la vitesse d'un fluide change le long de sa trajectoire, simultanément la pression varie. La relation entre la pression du fluide et sa vitesse, est connue comme étant le principe de Bernoulli (Encadré 2.2), qui peut-être dérivé du principe de conservation de l'énergie ou à partir de la deuxième loi de Newton ($F = ma$). Beaucoup d'organismes, tels que les éponges, les ascidies et d'autres suspensions, semblent tirer profit du mouvement de l'eau avoisinante pour améliorer leur activité de pompage (Vogel, 1978). Par exemple, les crevettes terriers *Callianassa filholi* construisent de grandes buttes avec une ouverture externe. Comparable à une cheminée de maison, l'écoulement passant au-dessus de la butte est accéléré (afin de s'ajuster à la diminution de section); cette accélération est accompagnée d'une diminution de pression au-dessus de l'ouverture, créant un courant ascendant dans le tube de ventilation.

DESCRIPTION DES ACTIVITES

Nous commençons souvent le débat sur la pression en montrant une image d'une danseuse debout sur un pied et un éléphant debout sur quatre pieds, nous demandons aux élèves de prédire lequel des deux exerce la plus forte pression sur le plancher. Les étudiants sont invités à exprimer leur vote, puis à calculer les pressions (en supposant que la masse d'un éléphant est de 6000 kg, la masse de la ballerine est de 45 kg, le rayon d'un pied de l'éléphant est de 30 cm, et le rayon de la pointe de la chaussure de ballet est de 1 cm). (Rappelons que la force [F] est égale au poids [ne pas confondre avec la masse] de l'objet: F = poids = mg, où m est la masse et g est l'accélération gravitationnelle de 9,8 m s^{-2}).

Nous utilisons les Activités 2.1 et 2.2 comme illustrations très démonstratives du concept de pression. La pression hydrostatique est illustrée dans les activités 2.3 et 2.4. Bien que ces deux activités mettent en évidence le même principe, les élèves expriment souvent que le fait de faire l'ensemble des deux activités améliore considérablement leur compréhension de la pression hydrostatique. Ils sont ainsi "forcés" de transférer les connaissances d'une situation à l'autre, ce processus les a incités à réévaluer leur compréhension. L'utilisation d'activités multiples pour illustrer un même concept donne à l'enseignant des possibilités supplémentaires d'évaluation. Les Activités 2.5 et 2.6 sont conçues pour démontrer le concept de la compressibilité de gaz sous pression, l'activité 2.5 constitue une illustration qualitative, et l'activité 2.6 est une illustration quantitative de la loi de Boyle. Pour démontrer le principe de Bernoulli, nous utilisons l'Activité 2.7. Les activités sont mises en place dans les laboratoires, comme décrit au Chapitre 1, et peuvent, éventuellement, être utilisées comme démonstrations en classe.

ACTIVITÉ 2.1. LIT DE CLOUS (Figure 2.1)

Matériel

- Deux plaques carrées en bois (même taille); une plaque avec un clou unique au centre; l'autre plaque possède une grille de clous (15 par 15 clous)
- Support annulaire
- Ballons de matériau, taille, et forme identiques
- Un anneau utilisé comme poids
- On insère un petit morceau de tube sur la partie verticale du support annulaire, pour faciliter le coulissement de

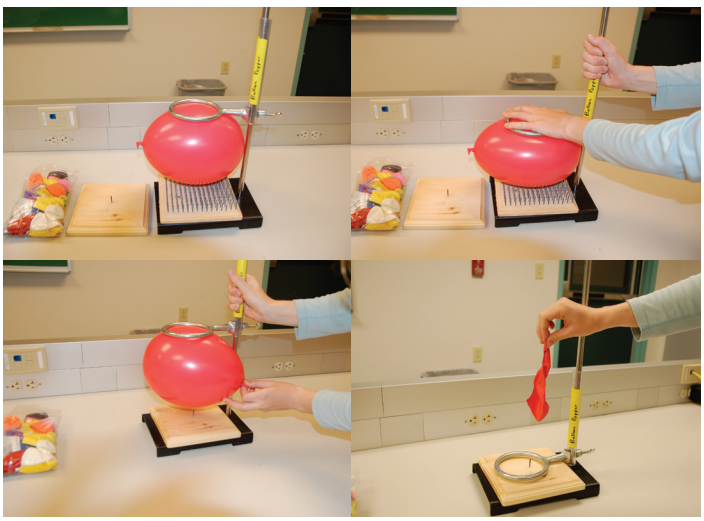

Figure 2.1. Activité 2.1 Montage et expérimentation avec un lit de clous (en haut) et un seul clou (en bas).

l'anneau le long de cette verticale et le mettre sur le ballon. Cependant, n'importe quel poids qu'on peut placer sur le ballon fera l'affaire.

Instructions aux Etudiants

1. Prédire ce qui arrivera à un ballon lorsque vous le placez sur chacune des plaques en appliquant à peu près la même force. Expliquez votre raisonnement.
2. Testez votre prédiction.

Explication

Lorsque le ballon est placé sur le lit de clous (Figure 2.1, figure en haut à gauche), la force qui est appliquée est répartie sur une surface large (la somme des têtes de tous les clous en contact avec le ballon). La pression résultante n'est pas suffisante pour faire éclater le ballon (figure 2.1, figure en haut à droite). Quand le ballon est placé sur un seul clou, il suffit d'une force faible pour que le ballon éclate parce que la force est désormais distribuée sur une plus petite zone (la zone en contact avec un clou; Figure 2.1, figure en bas à gauche) et une pression plus élevée entraîne l'explosion du ballon (figure 2.1, figure en bas à droite). C'est pour cette raison que, couché sur un lit de clous, on ressent les pointes mais on n'est pas blessé, alors que marcher sur un clou unique pourrait percer votre pied. Le même argument peut être utilisé pour expliquer pourquoi aiguiser un couteau ou une hache rend la découpe plus efficace.

ACTIVITÉ 2.2. PERCEPTION DU POIDS (Figure 2.2)

Matériel

- Grande bille d'acier creuse (12,5 cm de diamètre et une masse de 144 g; de sciencekit.com)
- Petite bille en acier massif (3,2 cm de diamètre et une masse de 129 g; de sciencekit.com)
- Deux grands entonnoirs identiques
- Une balance pour peser chaque bille



Figure 2.2. Matériel pour l'activité 2.2 (à gauche) et l'expérience (à droite).

Instructions aux étudiants

1. Tenez simultanément les deux billes dans la paume des mains. Laquelle vous semble la plus lourde?
2. Choisissez un volontaire et demandez à cette personne de fermer les yeux. Placez chaque bille dans un entonnoir et demandez au volontaire de tenir l'entonnoir par le bas du col. Demandez au volontaire d'indiquer quelle bille est la plus lourde et notez sa réponse. Répétez cette expérience avec d'autre (s) volontaire (s).
3. La perception du poids lors de la tenue des entonnoirs est-elle différente de la perception, dans la main, testez ? Pourquoi ?
4. Peser les billes et déterminer celle qui est la plus lourde. Expliquez vos observations.

Explication

En tenant chaque bille dans la paume de la main, la plus grande bille paraît plus légère que la petite. La force ($F = mg$) exercée par la grande bille est en fait supérieure à celle de la petite bille. Toutefois, comme l'effort est réparti sur une surface plus grande, la pression ($P = F/A$) est plus petite, et la plus grande bille semble plus légère. Quand les billes sont placées dans un entonnoir et maintenues par le col de celui-ci, la surface à laquelle la force est appliquée est similaire pour les deux billes et vous réaliserez alors que la grosse bille est légèrement plus lourde, ce qui est confirmé en utilisant une balance.

ACTIVITÉ 2.3. PRÊT, VAS-Y, GICLE (Figure 2.3)

Matériel

- Un tube avec un petit trou de sortie foré près du fond et sept grands trous forés le long du tube et bouchés avec des bouchons en caoutchouc (Figure 2.3, en haut). La distance entre le centre des trous est de 5 cm (peut être modifiée). Une version plus simple de cette activité peut être réalisée en collant deux bouteilles en plastique de 2 litres à mi-hauteur (Sharon Franks, UCSD, comm. Pers., Juin 2009)
- Un tube avec trois trous de tailles différentes percés à la même hauteur (Figure 2.3, milieu)
- Grande baignoire
- Règle
- Carafe d'eau
- Essuie-tout

Instructions pour les étudiants

Avant l'activité, nous passons en revue les équations d'hydrostatiques et nous donnons aux élèves les instructions suivantes (certains pourraient trouver que discuter de l'équation d'hydrostatique fonctionne mieux après avoir effectué la partie A).

Partie A

1. Vous avez un tube avec un petit trou de sortie en bas et plusieurs gros trous bouchés avec des bouchons en caoutchouc. Vous pouvez fixer la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du trou de sortie en bouchant simultanément le trou de sortie du bas avec votre doigt et en remplissant le tube jusqu'à ce que l'eau s'écoule d'un des trous supérieurs de grande taille (après avoir enlevé un bouchon du trou). Assurez-vous que vous ayez placé une latte perpendiculairement au fond du tube.
2. Avant d'utiliser ce dispositif: Que pensez-vous qu'il va se passer lors du remplissage du tube jusqu'à hauteur du premier grand trou (à partir du bas) et que vous relâchez votre doigt de l'orifice de sortie? Expliquez vos hypothèses en termes de forces agissant sur le fluide. Qu'imaginez-vous qu'il va se passer lorsque la hauteur d'eau au-dessus du trou de sortie aura augmenté? Pourquoi?
3. Testez vos prédictions. Commencez par enlever le bouchon en caoutchouc du grand trou situé le plus bas. Simultanément, maintenez votre doigt sur le trou d'évacuation du bas, remplissez le tube d'eau jusqu'à ce que l'eau s'écoule par le plus grand trou (réfléchissez : pourquoi voulons-nous maintenir un niveau d'eau constant à l'intérieur du tube?) À l'aide d'une latte, mesurez la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du trou du fond. Puis, retirez votre doigt du trou de sortie et laissez l'eau s'écouler, alors que vous continuez à remplir le tube d'eau pour maintenir la même hauteur de colonne d'eau au-dessus du trou de sortie. Notez la distance à laquelle l'eau gicle dès qu'elle touche la latte. Remplacez le bouchon et répétez les étapes pour les quatre trous suivants, en débouchant un trou à la fois.
4. Tracez la distance à laquelle l'eau a touché la latte en fonction de la hauteur de la colonne d'eau pour chacun des trous. Vos données sont-elles compatibles avec votre prédiction à l'étape 2?
5. La distance parcourue par l'eau, pour chacun des trous, changerait-elle si les trous étaient plus grands? Pourquoi?

Partie B

1. Prenez le second tube (avec trois trous de diamètres différents), couvrez les trois trous de vos doigts, et remplissez le tube d'eau. Placez la latte perpendiculairement au bas du tube, Découvrez le premier trou et mesurez la distance à laquelle l'eau atteint en premier la latte. Votre observation est-elle en accord avec votre raisonnement de l'étape 5 plus haut (Partie A)

On peut développer cet exercice pratique pour illustrer la notion de réservoir (un grand bassin de stockage, doté d'entrées et de sorties, dont le niveau (le volume) se modifie suivant les entrées et les sorties d'eau).

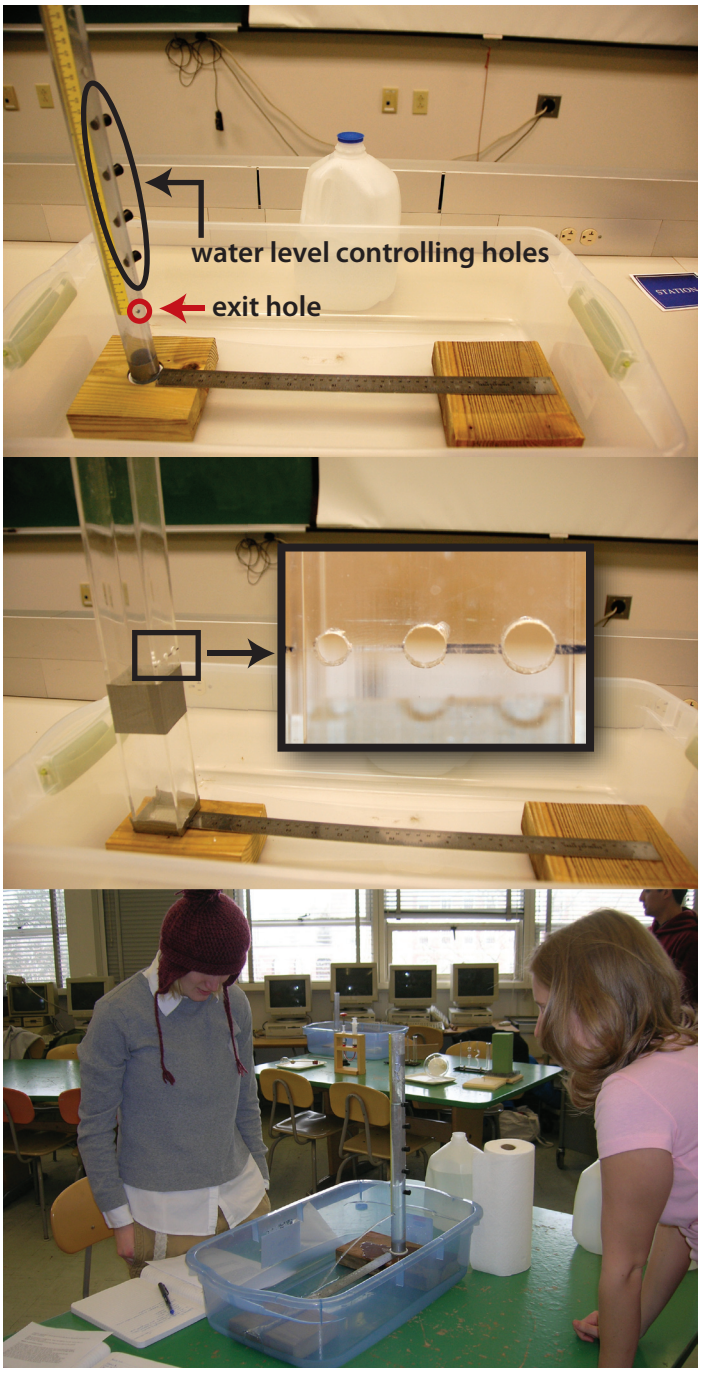

Figure 2.3. Matériel pour l'activité 2.3, partie A (en haut) et la partie B (milieu). Les étudiants effectuant la partie A (bas).

Explication

Partie A

Le poids de la colonne d'eau exerce une pression sur l'eau au niveau du trou de sortie (imaginez la section du tube au niveau du trou). Cette pression est plus élevée que la pression extérieure au tube (la pression atmosphérique), ce qui provoque le jet d'eau dès que le doigt est enlevé. Lorsque la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du trou de sortie augmente, la différence de pression augmente entre l'extérieur et l'intérieur, provoquant un jet d'eau à plus grande distance. Ce qui rappelle que la pression hydrostatique est proportionnelle à la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du trou (la contribution de la pression de l'air est identique des deux côtés du trou).

Partie B

Sauf pour de très petits trous (cas où le frottement est important), la taille du trou ne changera pas de manière significative la distance à laquelle l'eau tombe. Une manière de résoudre ce problème mathématiquement (pour les élèves plus avancés) est de considérer la pression ($P = \rho gz$) comme l'énergie potentielle ($PE = mgz$, où m est la masse) par unité de volume V. Ainsi, $PE/V = mgz/V = \rho gz$. Lorsqu'une quantité d'eau jaillit, la plupart de son énergie est transformée en énergie cinétique ($KE/V = \rho v^2/2$, où v est la vitesse perpendiculaire au trou). Par conservation d'énergie, $\rho v^2/2 = \rho gz$, ce qui veut dire que la vitesse et donc la distance parcourue par le fluide ne dépend pas de la taille du trou, elle est seulement fonction de la hauteur de la colonne (z).

La distance parcourue par le jet liquide peut être prédite à partir d'un argument simple familier aux étudiants ayant des connaissances de mécanique. Le fluide arrivera au sol à $t = \sqrt{2H/g}$ secondes après avoir quitté le trou, où H est la hauteur du trou au-dessus du sol, et la distance $L = vt$, où $v = \sqrt{2gz}$. En pratique, cette distance est plus faible, que la distance calculée, à cause du frottement aux parois du trou et avec l'air que le liquide rencontre avant d'atteindre le sol.

ACTIVITÉ 2.4. MANOMETRE ET TUBES EN ÉQUILIBRE (Figure 2.4)

Matériel

- Manomètre en forme de U (fabriqué à partir de matériel simple: tube en plastique transparent coupé en trois pièces jointes par deux coudes)
- Eau
- Huile
- Tube d'équilibre #1: bras de différentes formes (sciencekit.com)
- Tube d'équilibre #2: bras de diamètres différents (sciencekit.com)

Instructions aux Etudiants

Avant ces activités, les élèves ont revu la seconde loi de Newton qui, appliquée aux liquides, implique qu'en l'absence d'autres forces, le liquide s'écoule de la haute vers la basse pression.

Partie A

1. Prédire ce qui arrivera lorsque vous remplissez le manomètre en forme de U avec l'eau. Comment le niveau d'eau se répartit entre les deux bras? Pourquoi? Dessinez le manomètre en coupe transversale, montrant votre hypothèse, et expliquez votre raisonnement. (Astuce: Si l'eau est au repos [pas d'écoulement dans le tube], que pouvez-vous dire au sujet de la différence de pression sur la partie inférieure de chaque bras?) Remplissez le manomètre jusqu'à ce que vous puissiez voir clairement le niveau dans chaque bras, et comparez ce que vous observez par rapport à votre hypothèse.
2. Que pensez-vous qui arriverait au niveau du fluide dans chaque bras si vous ajoutiez de l'huile à un seul bras (une couche d'environ 5 cm)? Pourquoi? Si vous prévoyez un changement, dessinez un schéma qualitatif du nouvel équilibre.
3. Ajoutez l'huile. Est-ce que votre observation est en accord avec votre prédiction? Justifiez votre réponse.

Partie B

1. Étudiez le tube en équilibre avec des tubes de différentes formes. Prédisez le niveau de l'eau dans chacun des tubes (par rapport aux autres tubes) lorsque vous remplissez partiellement ce dispositif d'eau. Dessinez un schéma de votre prédiction et expliquez votre raisonnement.
2. Testez votre prédiction.
3. Est-ce que votre observation est en accord avec votre prédiction? Si non, comment expliquez-vous ce qui se passe?

Partie C

1. Étudiez l'équilibre de tubes de diamètres différents. Prédisez le niveau de l'eau dans chaque tube (par rapport aux autres tubes) lorsque vous remplissez ce dispositif d'eau. Dessinez un schéma de votre prédiction et expliquez votre raisonnement.
2. Testez votre prédiction.
3. Est-ce que votre observation est en accord avec votre prédiction? Si non, comment expliquez-vous ce qui se passe?

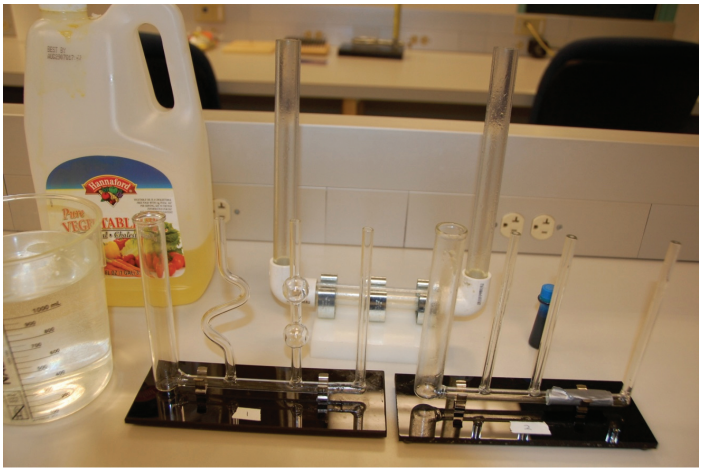

Figure 2.4. Le matériel utilisé dans l'activité 2.4. Le manomètre en forme de U (partie A) est montré en arrière plan. Au premier plan nous avons des tubes reliés de différentes formes (à gauche) et des tubes reliés cylindriques avec des bras de diamètre différent (à droite).

Explication

Partie A

Un manomètre est un appareil qui mesure la pression qui dépend de la hauteur du fluide. La forme la plus simple pour un manomètre est un tube en U rempli de fluide. Le niveau de l'eau dans chaque tube du manomètre est déterminé par la pression qu'exercent la colonne d'air et la colonne d'eau sur le fond du bras. Quand un tube du manomètre est rempli, l'eau coule dans l'autre tube jusqu'à ce que le système atteigne l'équilibre, à l'équilibre il n'y a plus d'écoulement dans le manomètre, ce qui signifie que la pression au fond des deux tubes est la même ($P_1 = P_2$ and $P_1 = g\rho_{eau}z_1 + P_{air}$; $P_2 = g\rho_{eau}z_2 + P_{air}$, donc $z_1 = z_2$). La hauteur de la colonne d'eau est la même dans chaque tube. Lorsqu'on ajoute de l'huile à la surface de l'eau dans un tube, le manomètre atteint un nouvel équilibre: $P_1 = P_2$ avec $P_1 = g(\rho_{huile}z_{huile} + \rho_{eau}z_{eau1})$ et $P_2 = g\rho_{eau}z_{eau2}$. Comme $\rho_{huile} < \rho_{eau}$, la colonne de liquide dans le tube avec de l'eau et l'huile est plus élevée que dans le tube avec de l'eau (la pression d'air est la même des deux cotés).

Cette activité peut être utilisée comme analogie avec l'approche de la hauteur dynamique dans le calcul des pentes des surfaces des océans et pour examiner la relation entre la densité intégrée et la hauteur d'une colonne d'eau. Le bas de l'appareil en forme de U est analogue au niveau de référence où l'on suppose une vitesse nulle. A chaque niveau au-dessus de la transition huile/eau, il y a une différence de pression entre les deux tubes du dispositif (donc, si nous connectons le tube au-dessus du fond, le liquide s'écoulera du tube contenant l'huile et l'eau vers le bras ne contenant que de l'eau jusqu'à ce que le système ait atteint un nouvel équilibre).

Partie B

La forme ou la section transversale du/des tube(s) d'un manomètre n'a aucun effet sur le niveau de l'eau. La hauteur de la colonne d'eau (ou de tout autre fluide) dans chaque tube est fonction de la pression et de la densité du fluide ($z = P/\rho g$). Ainsi, après que le fluide soit introduit dans la colonne et que le système a atteint son équilibre, la pression au fond de chaque tube est égale (pas d'écoulement) et le niveau de l'eau sera le même dans chacun des tubes, quelle que soit sa forme. Cette observation explique pourquoi la pression à une profondeur donnée est la même pression, que ce soit dans une piscine ou dans un lac (en supposant que la pression atmosphérique au-dessus de la piscine et du lac soit la même).

Partie C

Le même principe s'applique au tube en équilibre avec des tubes de diamètres différents. La hauteur de la colonne d'eau sera la même pour chacun des bras. La seule exception à cette affirmation se produit si un tube à un diamètre très étroit, pour lequel une autre force devient importante, il s'agit de la tension de surface sur le bord du verre qui à pour effet de tirer l'eau vers le haut (cette observation peut être utilisé comme un casse-tête, afin de faire des activités axées sur la tension de surface et la capillarité).

ACTIVITÉ 2.5. BALLONS RÉTRÉCIS (Figure 2.5)

Matériel

- Récipient dans lequel on peut faire le vide d'air utilisé pour la conservation des aliments (magasins spécialisés en ustensiles de cuisine)
- Bouteille de 2 litres munie d'une pompe à main, utilisée pour maintenir les bouteilles de soda gazéifié et qui peut être trouvée également dans les magasins d'ustensiles de cuisine
- Deux ballons de même taille (l'un rempli d'air, l'autre d'eau)
- Guimauves et tous autres éléments à tester (par exemple la mandarine, tomate cerise)

Instructions aux étudiants

1. Prédisez ce qui va se passer si on diminue la pression sur chacun des ballons.
2. Placez le ballon rempli d'air dans le récipient à vide d'air et évacuez l'air du récipient à l'aide de la pompe à main. Qu'advient-il du ballon? Ouvrez la vanne, permettant à l'air de remplir le récipient. Qu'advient-il du ballon, maintenant?

3. Répétez cette expérience avec le ballon qui est rempli d'eau. L'effet de la pression diffère-t-il entre les deux ballons? Pourquoi?
4. Sur la base de vos observations, que pensez-vous qu'il adviendra de la guimauve (et d'autres éléments à tester) lorsque vous évacuez l'air du récipient?
5. Testez votre prédiction.
6. Ouvrez la vanne et observez la guimauve. Expliquez vos observations.
7. Examinez le second appareil de pression. Comparez/différenciez vos observations sur le comportement du ballon rempli d'air avec cet appareil au comportement du ballon rempli d'air dans le récipient à vide. Quelle est la différence entre cet appareil et le récipient à vide?

Un challenge:

1. Comment remplir le ballon avec de l'air à l'intérieur de la bouteille ?
2. Comment utiliser cet appareil pour montrer que l'air a un poids ?

Explication

Les objets contenant des cavités d'air augmentent de volume lorsque la pression autour d'eux diminue, comme c'est le cas lors de l'évacuation de l'air à partir du conteneur (Figure 2.5, en haut à gauche). Parce que l'eau est, dans une large mesure, un fluide incompressible, la taille du ballon contenant de l'eau sera la même sous faible pression et sous pression atmosphérique. Une tomate cerise se comportera semblablement au ballon d'eau car elle ne contient pas de poches d'air. Une mandarine ou un guimauve, d'autre part, contiennent des poches d'air, et augmenteront de volume s'ils sont placés dans le vide. Lorsque la valve est relâchée, l'air se précipite de nouveau dans le conteneur, ce qui augmente la pression (jusqu'à atteindre la pression atmosphérique) et la mandarine ou la guimauve voient leur volume diminuer, mais pas nécessairement à leur taille d'origine parce que la structure de la matière a été modifiée dans le processus (par exemple, la fusion des cavités d'air dans la guimauve).

Lorsqu' on pressurise la bouteille de soda en pompant l'air dedans, la pression augmente autour du ballon et le ballon réduit de volume (augmentation de sa pression interne —comparer les images en bas à droite et à gauche dans la figure 2.5). En relâchant la soupape de pression le ballon gonflé est ramené à sa taille d'origine.

Défi: Pour insérer un ballon rempli d'air dans la bouteille, placez le ballon dans la bouteille, en laissant un petit espace pour insérer une paille entre le ballon et la paroi de la bouteille. Comme vous soufflez dans le ballon, l'air de la bouteille peut s'échapper à l'extérieur à travers la paille, ce qui permet au



Figure 2.5. (en haut) Matériel pour l'activité 2.5. (au milieu) Tester un récipient rempli d'air sous vide. (en bas) Un ballon rempli d'air sous pression atmosphérique (à gauche) et après que l'air soit pompé dans la bouteille (pression accrue; à droite).

ballon de se gonfler. Faites un nœud et poussez le ballon dans la bouteille. Cet appareil peut également être utilisé pour démontrer que l'air possède une masse non négligeable par pesage de la bouteille à pression atmosphérique, puis en pompant l'air dans la bouteille et en la pesant à nouveau (la masse est récupérée en divisant par g, fait automatiquement par les puces électroniques dans les balances).

ACTIVITÉ 2.6. COMPRESSIBILITÉ DES GAZ (Figure 2.6)

Matériel

- Appareil pour la compressibilité des gaz (Arbor Scientific, une version maison peut facilement être construite avec une seringue de 60 ml ce qui correspond à une section de 1 pouce carré)
- Poids étalonnés (nous utilisons des poids d'haltères de 2,5 livres)

Instructions aux étudiants

1. Noter le volume d'air dans la seringue dans des conditions de pression atmosphérique.
2. Que pensez-vous du volume d'air dans la seringue si vous placez 2,5 livres sur le sommet de l'appareil? Quelle est la pression dans la seringue?
3. Que deviendra le volume de l'air dans la seringue, si vous continuez à ajouter des poids? Par quel pourcentage le volume change-t-il au moment où vous placez 15 livres sur le piston de la seringue?
4. Testez vos prédictions. Placez un poids sur le haut de la seringue (2,5 livres) et notez le volume d'air. Placez des poids supplémentaires (au total 5 livres, 10 livres, et 15 livres) et notez la variation de volume d'air pour chaque masse ajoutée. Qu'observez-vous ?
5. Tracez un graphique des masses ajoutées en fonction du volume d'air dans la seringue. Comment varie le volume en fonction de la masse ajoutée? Est-ce en accord avec vos prédictions? Sentez-vous un changement de température lorsque vous comprimez l'air? Vous y attendiez-vous?
6. Dans quelle proportion la pression a–t-elle augmenté dans la seringue, par rapport à la une masse de 14.7 livre sur un pouce carré ou de pression atmosphérique (la pression exercée par une masse de 1 kg sur un centimètre carré à la surface de la Terre), quand tous les poids ont été mis sur la seringue (15 livres; en notant que la section de la seringue est d'un pouce^2)? De quel pourcentage, le volume de la seringue est modifié lors de l'ajout des 15 livres (en supposant aucun changement de température)?
7. Utilisation de vos données, comment estimez-vous le changement du volume des poumons d'un plongeur libre lors d'une plongée à 10 m? (Augmentation de la pression par une atmosphère tous les 10 m).



Figure 2.6. (en haut) Matériel pour l'activité 2.6. (en bas) L'appareil lesté de 15 livres.

Remarque: Il est difficile de trouver le système métrique approprié. Cette activité peut être l'occasion de pratiquer la conversion d'unité.

Explication

Dans cette activité, sous la pression atmosphérique normale, le volume d'air dans la seringue est de 46 ml. Pour un gaz parfait à température constante T, le volume V du gaz est inversement proportionnel à la pression appliquée sur le gaz (loi de Boyle: dans les conditions de température constante, le produit de la pression P par le volume V d'un gaz est constant → PV = constante et P = constante / V). Ainsi, l'ajout de poids

(augmentation de la pression) permettra de réduire le volume d'air dans la seringue. L'ajout de 15 livres sur la seringue double approximativement la pression (par rapport à la pression atmosphérique normale), et le volume d'air dans la seringue diminue de moitié, comme prévu par la loi de Boyle. De même, quand un plongeur libre plonge à une profondeur de 10 m, la pression qu'il subit double par rapport à celle à la surface. En conséquence, le volume de ses poumons sera réduit de moitié. Bien que nous nous attendions au fait que le gaz dans la seringue chauffe quand il est comprimé, les échanges de température avec la chambre sont infimes, d'où l'hypothèse d'une température constante reste valide. Cette activité illustre bien le poids de l'atmosphère, un poids que nous ignorons bien souvent dans la vie quotidienne.

ACTIVITÉ 2.7. SAC DE BERNOULLI

Pour démontrer le principe de Bernoulli, nous donnons aux étudiants un long sac en plastique (sac de Bernoulli; Arbor scientifique; Figure 2.7). Nous demandons à un élève de tenir l'extrémité ouverte du sac et à un autre élève de tenir l'extrémité fermée, de sorte qu'il soit tendu à l'horizontale, parallèle au sol. Nous demandons ensuite aux élèves s'ils peuvent remplir le sac avec une seule bouffée d'air. La tendance de la plupart des étudiants est de coller le sac contre leurs lèvres et souffler l'air dedans à plusieurs reprises, ce qui nécessite beaucoup de respirations (Figure 2.7, partie supérieure). Une technique beaucoup plus efficace consiste à souffler dans l'ouverture du sac à distance (Figure 2.7, partie inférieure), ce qui crée une zone de basse pression à proximité de l'ouverture où la vitesse est élevée. Cette dépression locale amène l'air de l'atmosphère environnante (où la pression est plus élevée), et tout l'air entre rapidement dans le sac. Le sac n'est pas élastique et offre peu de résistance à l'air qui s'engouffre (tant qu'il n'est pas plein).



Figure 2.7. (en haut) Un élève tente de remplir le sac tout en maintenant le sac contre les lèvres. (en bas) Lorsqu'on souffle en maintenant le sac bien ouvert à distance des lèvres, le sac peut être rempli avec un seul souffle d'air.

RÉFÉRENCES ET AUTRES LECTURES RECOMMANDÉES

Denny, M.W. 1993. Chapters 3 and 4 in Air and Water, Princeton University Press, Princeton, NJ.

Faber, T.E. 1995. Chapter 1 in Fluid Dynamics for Physicists, Cambridge University Press.

Hewitt, P.G. 2008. Chapter 7 in Conceptual Physics Fundamentals. Addison Wesley.

Richardson, D., ed. 2005. The Encyclopedia of Recreational Diving, 3rd ed. PADI, Santa Margarita, CA.

Vogel, S. 1996. Chapters 3 and 4 in Life in Moving Fluids. Princeton University Press, Princeton, NJ, 484 pp.

AUTRES RESSOURCES

Sorbjan, Z. 1996. Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments. American Meteorological Society, Washington, DC. A collection of hands-on experiments designed around concepts of meteorology. Chapitre 3 adresses la pression. En plus des expériences, le livre contient un historique et des références aux découvertes importantes et aux anecdotes concernant les scientifiques les plus réputés (et aussi ceux qui le sont moins).

Des film YouTube contenant des démonstrations du principe de Bernoulli par Julius Sumner Miller – Physics – Bernoulli:
Part 1: http://www.youtube.com/watch?v=KCcZyW-6-5o
Part 2: http://www.youtube.com/watch?v=wwuffpiYxQU&feature=related

ÉVÉNEMENTS INTRIGANTS : ÉVEILLER LA CURIOSITÉ DES ÉTUDIANTS

Pour attirer l'attention des étudiants, provoquer la réflexion et initier l'investigation, les éducateurs utilisent parfois les « événements intrigants» (Hassard, 2005; Chiapetta and Koballa, 2006). De tels événements présentent des surprises poussant les étudiants à s'émerveiller et à s'interroger (« Que se passe-t-il ? »). Un exemple d'un événement intrigant est l'activité 2.2. Les étudiants sentent que la plus petite balle est la plus lourde mais après avoir mesuré la masse de chaque balle, ils sont surpris de constater que la plus grande balle est la plus lourde des deux. Cette découverte les conduit à repenser le concept de la pression et du poids et les aide à différencier la force de la pression (force par unité d'aire). Un résumé de ces événements intrigants reliés à différents concepts en sciences, est déjà disponible sur internet et dans des textes pédagogiques en sciences. Par exemple, Liem (1987), a réuni pas moins de 400 événements intrigants qui utilisent du matériel simple – avec des plans d'explication, des questions, des explications – pour enseigner les sciences de l'école primaire à la 3éme secondaire.

Un événement intrigant demande souvent peu d'instructions. Par exemple, au début du cours, un instructeur peut remplir en silence un quart d'une bouteille (transparente) de 2 L de soda avec de l'eau très chaude. Il fait tourbillonner l'eau quelques secondes pour réchauffer la bouteille, jette l'eau, ferme hermétiquement la bouteille et la place bien en vue pour les étudiants. Pendant que l'instructeur continue son cours, la bouteille commence à se froisser. Invariablement, les étudiants vont être intrigués et vont commencer à poser des questions sur l'eau et la bouteille. L'instructeur peut guider la dynamique du questionnement et des hypothèses du groupe ainsi que les explications de cet événement, ce qui amènera à la discussion de la loi sur les gaz et la relation entre température, pression et volume.

Amener un questionnement sous la forme d'un événement inattendu défie leurs idées et connaissances et cela accroît la motivation pour trouver une solution. A travers le procédé de l'investigation qui conduit à la découverte, les étudiants peuvent atteindre un nouveau niveau de connaissance et de compréhension et ils peuvent développer une habileté à résoudre des problèmes (Piaget, 1971). Les événements intrigants n'ont pas besoin d'être une activité physique ; ils peuvent être présentés par un film, une description, un terrain d'observation (par exemple, le magnétisme réversible des roches) qui amène des paradoxes étonnants.

Les événements intrigants peuvent être utilisés pour atteindre des buts pédagogiques spécifiques – commencer une leçon et attirer l'attention des étudiants, provoquer un questionnement, épingler les idées fausses, amener les étudiants à penser à un procédé, à un problème même après la leçon, tester pour vérifier si les étudiants peuvent appliquer ce qu'ils ont appris. A chaque fois qu'un événement intrigant est présenté, c'est important de donner assez de temps pour permettre aux étudiants de réfléchir, discuter et essayer de trouver des explications.

REFERENCES

Chiappetta, E.L., and T.R. Koballa Jr. 2006. Science Instruction in the Middle and Secondary Schools: Developing Fundamental Knowledge and Skills for Teaching, 3rd ed. Pearson/Merrill Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 320 pp.

Hassard, J. 2005. The Art of Teaching Science. Oxford University Press, 496 pp.

Liem, T.L. 1987. Invitations to Science Inquiry, 2nd ed. Science Inquiry Enterprise, Chino Hills, CA, 488 pp.

Piaget, J. 1971. Biology and Knowledge. University of Chicago Press, Chicago, IL.

CHAPITRE 3. FLOTTABILITÉ

OBJECTIF

Cet ensemble d'activités a été conçu pour aider les élèves à mieux comprendre les principes sous-jacents de la flottabilité. La plupart des étudiants ont déjà entendu le terme flottabilité et l'ont expérimenté dans l'océan, une piscine, ou un bain. Certains sont même capables de réciter le Principe d'Archimède. Toutefois, notre expérience a montré que les étudiants ont souvent du mal lorsqu'on leur demande d'aborder des questions liées à la flottabilité. Des recherches menées à l'Université de Washington ont révélé que de nombreux scientifiques et ingénieurs avaient des lacunes dans la compréhension de la flottabilité même après avoir pris des cours d'introduction à la physique de l'hydrostatique (par une approche pédagogique classique) et n'ont pas été en mesure de prédire ou d'expliquer, le flottement ou non de différents objets (Loverude et Al., 2003).

Nous abordons la notion de flottabilité avec nos élèves une fois qu'ils ont déjà accompli les laboratoires sur la densité (chapitre I) et sur la pression (chapitre 2). Pour la leçon densité, les étudiants ont examiné la flottabilité ou la non-flottabilité de différents objets en fonction de leur densité, mais n'ont pas investigué les principes sous-jacents qui régissent ces comportements. Les activités ci-dessous permettent aux étudiants d'appliquer les connaissances acquises au cours des deux précédentes leçons en vue d'explorer les facteurs qui régissent la flottabilité.

CONTEXT ET NOTIONS DE BASE

Quand un objet est immergé dans un fluide, le liquide se déplace pour "faire de la place" à l'objet. Par exemple, lorsque vous entrez dans une baignoire, le niveau de l'eau monte. La quantité d'eau déplacée par un objet complètement submergé est égale au volume de l'objet (par exemple, rappeler les mesures de volume de la roche dans l'activité 1.3). L'objet immergé est soumis à deux forces: (1) la force de gravité dirigée vers le bas, qui augmente quand la masse de l'objet augmente, et (2) une force vers le haut, la force de flottabilité, qui augmente quand la densité du fluide augmente. Lorsque la force gravitationnelle est supérieure à la force de flottabilité, l'objet coule; sinon l'objet flotte.

La force de flottabilité résulte d'un déséquilibre dans les pressions exercées sur l'objet par le fluide. Parce que la pression augmente avec la profondeur, le fond de l'objet immergé subit une pression plus élevée que le haut de l'objet, par conséquent, l'objet subit une force vers le haut. La force ascensionnelle qui résulte est égale au poids du fluide déplacé (Principe d'Archimède). Si le poids d'un objet (dans l'air) est supérieur au poids du fluide déplacé, il coulera, s'il est inférieur, il flottera.

En termes mathématiques, les deux forces opposées peuvent être écrites (basé sur la deuxième loi de Newton) comme:

$$F_{flottabilité} = m_{fluide}\, g = \rho_{fluide}\, V_{déplacé}\, g$$

et

$$F_{gravité} = m_{objet}\, g = \rho_{objet}\, V_{objet}\, g.$$

m_{fluide} et m_{objet} est la masse du fluide déplacé et de l'objet respectivement, g est l'accélération constante de gravitation, ρ_{fluide} et ρ_{objet} représente la masse volumique du fluide et de l'objet respectivement, $V_{déplacé}$ et V_{objet} est le volume de l'eau déplacée et de l'objet, respectivement. Lorsque l'objet est totalement immergé, $V_{déplacé} = V_{objet}$ .Par la définition de la masse volumique, $m = \rho V$ (rappel). La différence entre les deux forces détermine si l'objet surnage, coule ou flotte entre deux eaux,

$$\Delta F = F_{gravité} - F_{flottabilité} = V_{objet}\, g\, (\rho_{objet} - \rho_{fluide}).$$

Lorsque $\Delta F > 0$, l'objet coule. Lorsque $\Delta F < 0$, l'objet flotte. Et quand $\Delta F = 0$, l'objet reste à sa profondeur (il flotte entre deux eaux, c'est-à-dire que $\rho_{objet} = \rho_{fluide}$). Donc, la clé du maintien d'un navire à flot, qu'il soit fabriqué de bois, d'acier ou de béton, est de lui faire déplacer un volume d'eau qui pèse plus que le navire lui-même.

Applications aux océans

La flottabilité est l'une des quatre forces dominantes dans la dynamique des océans (les trois autres sont la gravité, la force du vent, et la friction), et la compréhension de la flottabilité est essentielle pour comprendre la circulation liée à la densité. La circulation océanique thermohaline à grande échelle, par exemple, est attribuée à de grandes différences dans les forces de flottabilité, due aux différences entre les hautes et faibles températures de l'eau. En refroidissant et en s'évaporant l'eau de mer devient plus dense, ainsi les eaux de surface soumises à ces conditions tendent à couler. Le réchauffement et les précipitations, en revanche, diminuent la densité de l'eau de mer, ainsi les eaux de surface soumises à ces conditions tendent à flotter à la surface de l'océan.

Le niveau d'un objet qui flotte dans un liquide (par exemple, l'eau de mer ou le magma) dépend de l'équilibre entre les forces de flottabilité et gravitationnelle auxquelles l'objet est soumis. Les plaques lithosphériques de la terre, par exemple, flottent sur l'asthénosphère (le manteau supérieur) à un niveau d'équilibre (équilibre de flottabilité appelé "isostasie"). Quand un équilibre de flottabilité est perturbé, l'objet va couler ou émerger jusqu'à atteindre un nouvel équilibre de flottabilité. Ce processus est appelé «nivellement isostatique ». Les effets de nivellement isostatique peuvent être vus près des dorsales médio-océaniques où la lithosphère fraîchement formée refroidit et ajoute du poids à la crête sous-jacente (la force de gravité a augmenté) et sur les plaques continentales où de grands glaciers ont récemment fondu (la force de gravité a diminué). Les changements dans l'équilibre de flottabilité des plaques lithosphériques provoqueront une hausse ou une baisse relative du niveau des mers le long des côtes associées à la plaque.

De nombreux organismes marins doivent faire face à la régulation de la flottabilité. Les protéines, les tissus conjonctifs, des squelettes et des coquilles, tous ont des densités supérieures à la densité de l'eau de mer. Les organismes dont la densité corporelle est élevée peuvent descendre au-dessous de leur zone de croissance optimale (par exemple, l'amortissement du phytoplancton sous la zone photique) et être exposés à des changements de pression, de lumière et de température. En réponse à ces défis, les organismes marins ont développé une variété de stratégies pour contrôler leur flottabilité, par exemple l'échange sélectif d'ions plus lourds par des ions plus légers, le stockage des graisses et des lipides, et l'utilisation de cavités remplies de gaz.

La flottabilité est aussi un principe fondamental dans la conception des bateaux, navires, sous-marins, et des véhicules autonomes sous-marins (VUA), ce dernier étant un chef d'œuvre en termes de technologie océanique et d'exploration. Des planeurs et des flotteurs autonomes, munis de divers capteurs (température, salinité, et d'optique), montent et descendent dans une colonne d'eau en changeant leur volume et donc la poussée d'Archimède qui agit sur eux. Le principe de fonctionnement est l'échange d'un fluide incompressible entre un réservoir interne et une vessie gonflable externe. Pour une illustration d'un flotteur qui utilise ce mode de régulation de la flottabilité, visitez: http://www.argo.ucsd.edu/FrHow_Argo_floats.html.

DESCRIPTION DES ACTIVITÉS

Nous commençons la leçon par une brève introduction ou révision des forces qui agissent sur un objet immergé, après quoi les étudiants se livreront aux activités ci-dessous, le travail se faisant en petits groupes. Deux des activités (3.1 et 3.2) sont des représentations quantitatives du principe d'Archimède, ce qui permet aux élèves d'explorer les relations entre la masse d'un objet, la masse du volume qu'il déplace (proportionnelle à la force de flottabilité), et sa flottabilité. Nous demandons aux étudiants de participer aux deux activités (l'ordre n'a pas d'importance). En faisant cela, nous pouvons renforcer les principes concernant la flottabilité, de permettre aux étudiants de pratiquer le transfert de connaissances acquises d'une situation à l'autre, et de tester leur compréhension. Les deux autres activités (3.3 et 3.4) sont ce que nous appelons «recherche ouverte » : les étudiants possèdent des instructions moins fournies et on attend d'eux qu'ils synthétisent et appliquent les connaissances acquises sur la densité et la pression dans les leçons précédentes (chapitres 1 et 2 dans le présent document) pour expliquer un phénomène donné et construire un flotteur. Les applications à l'environnement aquatique sont discutées lors de l'examen et la session de discussion à la fin de la leçon. Les activités sont mises en place dans les stations comme décrit au chapitre 1.

ACTIVITÉ 3.1. MAYDAY! (Figure 3.1)

Matériel

- Boîte d'Archimède (une boite avec des graduations tous les centimètres)
- Un dynamomètre
- Plusieurs poids de 5 et 10 grammes
- Un récipient avec de l'eau
- Un statif
- Un mètre
- Une balance

Remarque: la boîte d'Archimède, le dynamomètre et les poids peuvent être obtenu de sciencekit.com.

Instructions aux étudiants

1. Supposons que la boîte est un cargo. En tant que membre de l'équipage, vous devez déterminer le poids maximal (en grammes) que vous pouvez charger sur votre bateau sans le

couler. Au chargement maximal, la boîte (votre vaisseau) sera à peine complètement submergée, de sorte que son sommet touchera juste la surface de l'eau. Sur base de ce que vous savez sur la flottabilité et le principe d'Archimède, comment pouvez-vous déterminer la charge maximum de la cargaison? Expliquez votre raisonnement. (Astuce: Pensez au poids d'un objet dans l'air et dans l'eau [complètement immergé] et le volume qu'il déplace. Utilisez le dynamomètre et la règle pour faire des mesures qui peuvent aider votre prédiction. Pour utiliser le dynamomètre, fixez-le au statif et suspendez-y la boîte avec un crochet).

2. Ajoutez la charge maximum selon vos prédictions dans la boîte (le navire), fermez le couvercle, et testez votre prédiction en plaçant le navire chargé dans le bac d'eau et observez s'il est à peine complètement immergé, mais sans couler.
3. Si votre prédiction était juste, quelle est la masse du navire + sa cargaison dans l'air? Quelle est la masse du navire + sa cargaison dans l'eau? Quel est le volume et la masse de l'eau qui a été déplacée?
4. Si votre prédiction n'était pas correcte (c.-à-d. si le navire coule ou flotte bien au-dessus de la surface de l'eau), revoyez vos prédictions et recommencez.
5. Une fois que vous avez trouvé la charge maximale, ajoutez-y 25 g en plus et remettez la boîte dans l'eau. Que se passe-t-il? Pourquoi?
6. Quel est le nouveau poids du navire+ sa cargaison dans l'air? Prédisez le poids du navire + sa cargaison dans l'eau. Utilisez le dynamomètre pour peser. Votre mesure est-elle en accord avec vos prévisions?

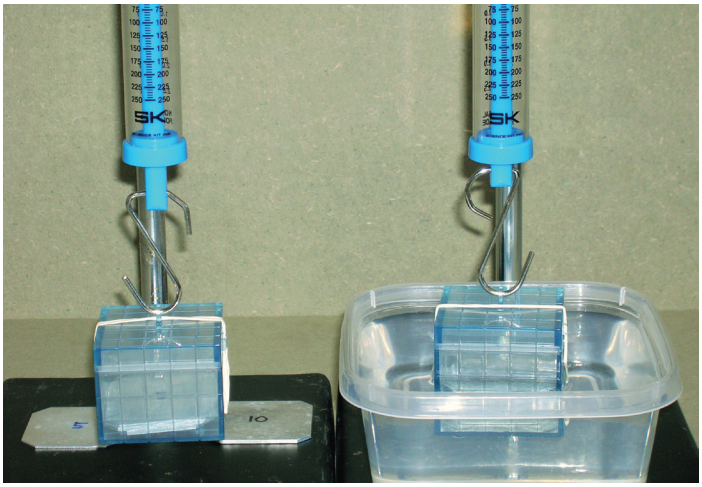

Figure 3.1 Dispositif pour l'activité 3.1 dans l'air (à gauche, les deux poids reposent sur la table) et dans l'eau (à droite).

7. Quel est le poids du volume d'eau déplacé? Comment faut-il comparer le poids du navire +sa cargaison dans l'air et dans l'eau?
8. Pouvez-vous expliquer pourquoi un objet dans l'eau semble plus léger?

Remarque pour les professeurs: Si vos élèves éprouvent des difficultés à prédire la charge maximale, sur base du principe d'Archimède, alors suggérez qu'ils approchent le problème en procédant comme suit :

1. Mesurer et calculer la masse et le volume de la boîte sans la charge. Ajouter la charge par tranche de 25 g. Après chaque ajout, faites les mesurer:
   a. Le poids de la boîte hors de l'eau (en utilisant le dynamomètre)
   b. Le poids de la boîte dans l'eau
   c. La hauteur de l'immersion de la boîte dans l'eau (chaque marque sur la boîte est de 1 cm)
2. Pour chaque tranche, calculez le volume d'eau déplacé par la boîte. Tracer la hauteur de l'immersion dans l'eau en fonction du poids de la boîte + poids ajouté. Voyez-vous un lien entre la masse de la boîte + poids (dans l'air) et le volume déplacé? Quel est le poids de la boîte dans l'eau dans chaque cas?

Lorsque les élèves complètent ces mesures, qu'ils fassent les étapes 3-4.

Explication

La boîte utilisée pour cette expérience a une base de 5 cm x 5 cm = 25 cm^2 et une hauteur de 4cm. Donc le volume de la boîte est de 100 cm^3 (avec son couvercle). La boîte vide pèse 25 g; et donc sa densité est de 0.25 g cm^3. Lorsque la boîte est complètement immergée, elle déplace exactement son volume (100 cm^3) ; et donc la masse de l'eau déplacée est de 100g (1 $cm^3 \approx$ 1 g). Selon le principe d'Archimède, lorsque un objet "flotte entre deux eaux"(ne coule pas, ne flotte pas), $F_{flottabilité} = F_{gravité}$, où $F_{flottabilité} = \rho_{eau} V_{déplacé} g$. Comme ρ_{eau} et g sont tous deux constants dans ce cas, $F_{flottabilité}$ est proportionnelle au volume déplacé. La charge maximale qui peut être ajoutée sans que la boîte ne coule est de 75 g ($m_{boîte} + m_{poids}$= 25 g + 75 g = 100 g). Lorsque la boîte flotte à peine $F_{gravité}$ est égale à $F_{flottabilité}$ (rappel $F_{gravité} = mg$).

Lorsque les élèves mènent cette activité par étapes, en ajoutant les masses, par tranches de 25 g, ils peuvent examiner de près la relation entre la masse d'un objet dans l'air, le déplacement de l'eau (profondeur d'immersion), et la masse apparente de l'objet dans l'eau, comme le montre le tableau ci-dessous

Masse ajoutée (g)	poids total dans l'air (boîte + poids) (g)	poids dans l'eau (g)	profondeur d'immersion (cm)	Volume déplacé (cm^3)
0	25	0	1	25
25	50	0	2	50
50	75	0	3	75
75	100	0	4	100

Conformément au principe d'Archimède, la boîte coule lorsque son poids est supérieur à celui de l'eau déplacée. Ainsi, quand un supplément de 25 g est ajouté, la masse totale de la boîte + poids dans l'air est 125 g, ce qui est plus grand que la masse du volume déplacé (100 g), le "navire" coule. Le poids de la boîte + poids dans l'eau est de 25 g, ce qui correspond à la différence entre la force gravitationnelle et la force de flottabilité.

Comme *g* est constant, on ne considère que les masses de la boîte et l'eau déplacée, mais nous insistons pour que les élèves ne confondent pas masse et poids (poids = *mg*). Il est également important de discuter avec les étudiants explicitement la différence entre le cas d'un objet flottant et le cas d'un objet immergé. Dans les deux cas, l'ampleur de la poussée d'Archimède est égale à la masse de l'eau déplacée. Toutefois, pour un objet flottant, le volume qu'il déplace (la force de flottabilité) est déterminé par le poids de l'objet, divisée par la densité du fluide; pour un objet complètement submergé, le volume déplacé est déterminé par le volume de l'objet (la densité ne joue pas de rôle).

ACTIVITÉ 3.2. LA BALLE D'ARCHIMÈDE (Figure 3.2)

Matériel :

- Une balle d'Archimède (à se procurer chez sciencekit.com)
- Une seringue de 60 mL
- Un morceau de tube en plastique
- Une règle graduée
- Un récipient et de l'eau.
- Un récipient contenant de l'eau sucrée qui est le « liquide inconnu ».

Instructions pour les étudiants

1. Supposez que la balle est un sous-marin : il faut qu'elle se maintienne sous le niveau d'eau avec le bouchon tout juste affleurant (c'est la position de flottaison « neutre »). Calculez quel poids d'eau supplémentaire vous devez ajouter pour obtenir cette flottaison (si vous ne voyez pas comment faire, dessinez le sous-marin et les forces qui agissent sur lui lorsqu'il est immergé).

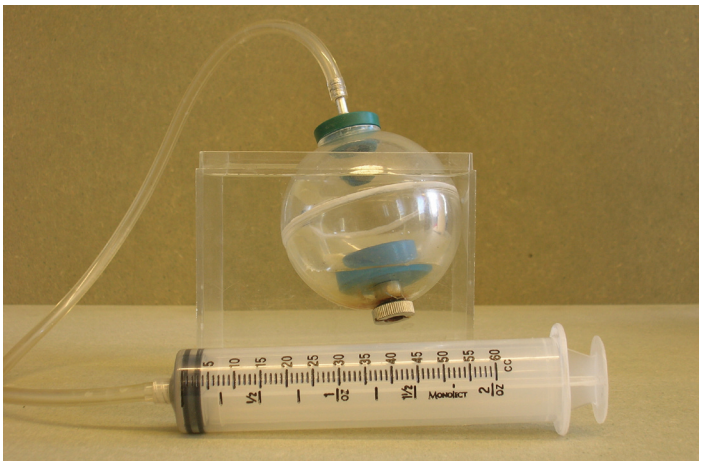

Figure 3.2. Dispositif pour l'activité 3.2.

2. Vérifiez votre résultat expérimentalement en mesurant, grâce à la seringue, l'eau supplémentaire nécessaire. Le volume correspondant est-il conforme à votre calcul ?
3. Immergez maintenant votre sous-marin dans le liquide inconnu et mesurez, toujours grâce à la seringue, combien vous devez ajouter de liquide inconnu pour atteindre la flottaison neutre. En comparant ce nouveau résultat au précédent, comparez la densité du liquide inconnu à celle de l'eau.

Explications

La balle que nous utilisons ici a une masse volumique de 0,7 g cm^{-3} qui est donc plus faible que celle de l'eau (1 g cm^{-3}) ce qui explique qu'elle flotte sur l'eau. Pour atteindre une flottaison neutre, c-à-d presque totalement submergée, il est nécessaire d'y ajouter un certain poids d'eau. La masse de cette balle est 124,5 g et son volume est 176 cm^3 ce qui signifie qu'elle occupe le même volume que 176 g d'eau lorsqu'elle est totalement submergée. Il faut ainsi compenser par 52 g d'eau environ, soit 52 mL pour que la densité de la balle soit égale à celle de l'eau et qu'elle atteigne la situation de flottaison neutre. Dans le liquide inconnu, les étudiants doivent ajouter un volume d'eau plus important ce qui indique que la densité de celui-là (de l'eau sucrée) est supérieure à celle de l'eau puisque la poussée d'Archimède est elle aussi plus grande.

ACTIVITÉ 3.3. FABRICATION DES FLOTTEURS (Figure 3.3)

Matériel

- Des récipients contenant de l'eau et une solution salée
- Deux gobelets
- Des boîtes de film photo ou autres petits récipients.
- Des poids (boulons, rondelles, pièces de monnaie...)

- Divers : des ballons gonflables, des élastiques, de la bande autocollante, des pailles, des tubes en plastique (pour aquarium), un pistolet à colle, de la colle, des trombones, du ruban adhésif, du plastique à bulles, de fines brosses (cure-pipes), des seringues, des bouchons, des morceaux de frigolite d'emballage
- Une règle graduée
- Un verre à pied gradué
- Un aquarium contenant 2 liquides en couches (eau et eau salée).

Remarque : la solution salée utilisée ici doit être identique à celle mentionnée en début de liste.

Instructions pour les Étudiants

Vous devez fabriquer 2 flotteurs autonomes qui pourront transporter les capteurs (anneaux) destinés à mesurer les propriétés hydrographiques (température, salinité) et biogéochimiques (oxygène, fluorescence de la chlorophylle, turbidité) de l'eau de l'Ocean. L'un des flotteurs doit pouvoir dériver à la surface : il doit flotter de sorte que le sommet de son bouchon soit juste au niveau de l'eau. Le deuxième doit rester exactement au pycnocline c'est-à-dire au niveau où la densité change le plus, entre les deux liquides ; il ne doit pas toucher le fond du récipient.

Votre premier objectif est de concevoir un prototype de flotteur que vous pourrez présenter à vos collègues (les autres élèves de la classe). Vous disposez pour cela de récipients contenant le liquide de surface (de l'eau) et celui des eaux profondes (eau salée). Votre présentation doit inclure une description des flotteurs et le détail de votre raisonnement pour déterminer les conditions de flottaison. A la fin de la séance, vous devrez démontrer que vos prototypes ont bien le comportement attendu.



Figure 3.3. Un étudiant teste l'activité 3.3 dans des liquides en couches différentes.

Explications

Cette activité permet d'inclure un petit caractère compétitif à la leçon. En général, les étudiants résolvent cette question par essai et erreur. Il faut donc les encourager à tester leurs idées à partir du principe d'Archimède. A la fin de la séance, les différentes équipes peuvent tester la flottaison des modèles dans un récipient beaucoup plus large (attention : il faut utiliser la même solution salée que précédemment !).

ACTIVITÉ 3.4. LE LUDION (Figure 3.4)

Cette expérience classique se réfère à celle du philosophe, physicien et mathématicien français René Descartes. Elle utilise le principe d'Archimède et la relation entre la pression et volume pour les gaz (parfaits).

Matériel

- Une bouteille en plastique fermée de façon hermétique et remplie d'eau (de l'eau colorée est préférable)
- Une pipette en plastique lestée par des boulons ou rondelles métalliques. Remarque : on trouve les instructions pour fabriquer un ludion à l'adresse http://www.raft.net/ideas/Pipette9620Diver.pdf.

Instructions pour les étudiants

1. Serrez la bouteille de façon à l'écraser. Pourquoi la pipette flottant dans l'eau se met-elle à couler ? Pourquoi remonte-t-elle lorsque vous relâchez la pression.
2. Expliquez le comportement de la pipette par la pression et la poussée d'Archimède.

Explication

Selon le principe de Pascal, toute pression appliquée à un fluide est transmise partout dans ce fluide. Lorsque vous écrasez la bouteille, vous augmentez la pression dans l'eau qu'elle contient jusqu'à l'intérieur de la pipette qui contient de l'air. Le volume d'air qui y est emprisonné va ainsi diminuer ce qui amène l'eau à y entrer (pour rappel, la loi des gaz parfaits : $pV=RnT$ où p est la pression, V le volume, n le nombre de moles de gaz et R la constante des gaz parfaits indique qu'à température T constante,

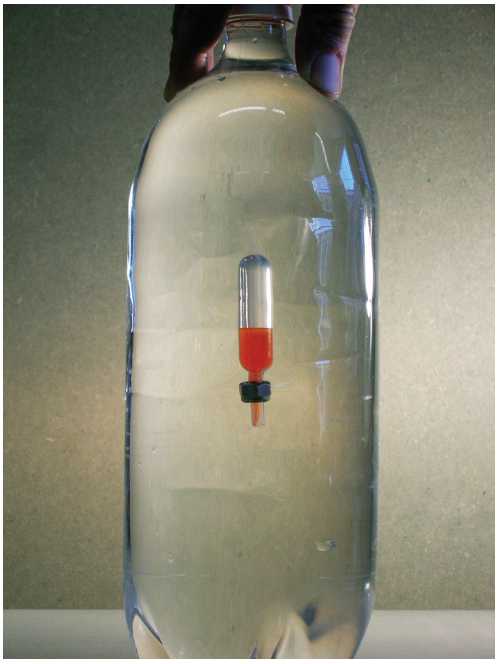

Figure 3.4. Un ludion.

la pression augmente autant que le volume diminue). L'eau étant plus dense que l'air, le poids de la pipette augmente de telle sorte qu'elle se met à couler.

ACTIVITÉ SUPPLÉMENTAIRE (Figure 3.5)

Comme synthèse, voici un questionnaire basé sur les concepts de la leçon ainsi que sur les notions de densité, de pression et la résolution de problèmes, en général. Le défi est présenté comme suit : « *Vous disposez d'une grosse pierre dans un bateau flottant sur un étang. Si vous jetez la pierre dans l'eau, elle coule ; le niveau d'eau de l'étang augmentera-t-il, baissera-t-il ou restera-t-il identique ?* »

Pour résoudre ce problème, on doit comparer le volume d'eau déplacé par le roc dans le bateau ($V_{dépl_b}$) à celui déplacé par la pierre au fond de l'eau ($V_{dépl_f}$). Quel est le plus grand ?

Dans le bateau : par le principe d'Archimède, on obtient $m_{roc} \cdot g = m_{dépl_b}\, g$ et comme la définition de la masse volumique indique que $m_{roc} = \rho_{roc} V_{roc}$ et $m_{dépl} = \rho_{fluide}\, V_{dépl}$, on obtient que $V_{depl_b} = V_{roc}\, \rho_{roc} / \rho_{fluide}$. Quand le roc est au fond de l'eau : le volume déplacé est simplement égal au volume du roc : $V_{dépl_f} = V_{roc}$. Finalement le rapport des deux volumes d'eau déplacés est $V_{dépl_b} / V_{dépl_f} = \rho_{roc} / \rho_{fluide}$ et comme le roc coule, le volume d'eau déplacé est plus important lorsque le roc est dans le bateau. Ceci implique que le niveau d'eau du lac diminuera lorsque le roc est jeté à l'eau. Remarque : le volume d'eau déplacé par le seul poids du bateau est exactement le même dans les deux cas de sorte qu'il ne joue aucun rôle.

Il faut donner un peu de temps aux étudiants pour tenter de répondre à la question et ensuite leur demander quelle réponse ils favorisent. Les votes seront certainement dispersés. Groupez ensuite les étudiants par type de réponse. Chaque groupe devra ensuite trouver une justification physique de son vote ou, à défaut, expliquer pourquoi celui-ci se révèle erroné. Les arguments seront alors présentés à la classe.

Après la présentation de chaque groupe, on peut mettre leurs prédictions à l'épreuve : vous aurez besoin d'un bateau jouet, d'un poids ou d'un gros caillou et d'un récipient rempli d'eau. Placez le bateau dans l'eau et chargez-le du poids (ou du caillou). Marquez le niveau d'eau obtenu et laissez ensuite couler le poids dans l'eau afin de marquer le nouveau niveau d'eau (Figure 3.5).

Grâce à ce genre de synthèse, les étudiants ne sentent pas la pression habituellement liée à une interrogation ou un examen. Pourtant, ils sont amenés à appliquer leur connaissance du sujet, à identifier leurs lacunes éventuelles et à chercher à pallier les difficultés. L'animateur passera d'un groupe à l'autre pendant la rédaction des explications en notant l'implication de chacun et les points encore difficiles. Tous les concepts non encore maîtrisés seront passés en revue durant la démonstration. Un autre exercice de synthèse possible utilise le problème des 5 blocs décrit dans Loverude et al. (2003).

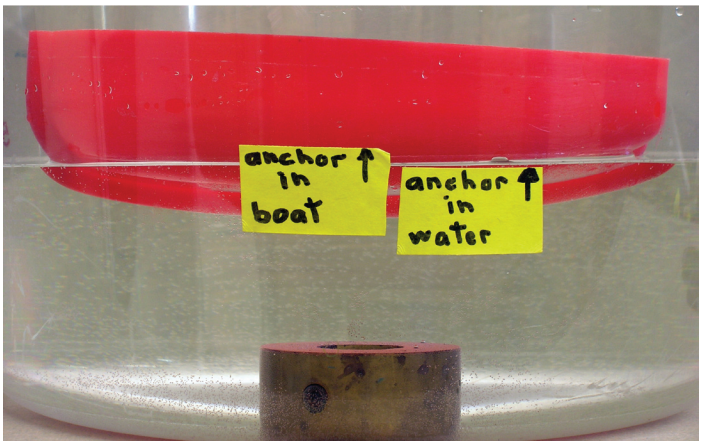

Figure 3.5. Le niveau d'eau quand le poids est dans le bateau (marqué « anchor in boat ») et celui obtenu quand le poids est au fond (marqué « anchor in water ») sont bien visibles.

REFERENCES ET AUTRES LECTURES RECOMMANDEES

Denny, M.W. 1995. Chap 3 et 4. Air in water.Princeton University Press, Princeton, NJ.

Hewitt, P.G. 2008. Chap 7. Conceptual Physics Fundamentals. Pearson Addison-Wesley.

Loverude, M.E, C.H. Kautz, and P.R.I. Heron. 2003. Helping students develop an understanding of Archimede's principle. I. Research on student understanding. American Journal of Physics 71(1) : 178-1,187.

Vogel, S. 1996. Chap 3 et 4. Life in Moving Fluids. Princeton University Press. Princeton, NJ.

AUTRES RESSOURCES

Sorbjan, Z. 1996. Hands-on Meteorology : stories, Theories and Simple Experiments. American Meteorological Society. Washington, DC. Une collection d'expériences hands-on construites autour des concepts météorologiques. Le chapitre 7 a trait à la flottaison. En plus des expériences, le livre contient un historique et des références aux découvertes importantes et aux anecdotes concernant les scientifiques les plus réputés (et aussi ceux qui le sont moins).

EVALUER L'APPRENTISSAGE DE L'ÉTUDIANT

Evaluer l'apprentissage des étudiants est un aspect essentiel et parfois stimulant de l'enseignement. Les tests « papier-crayon » sont une forme commune d'évaluation, bien qu'ils tendent plus à vérifier la mémorisation plutôt que la compréhension, la synthèse ou l'application de la connaissance. Poussés par l'administration, la société et les étudiants eux-mêmes pour avoir des points (grades), les éducateurs utilisent souvent des tests classiques comme par exemple un test à choix multiples (QCM). Pourtant, les résultats des tests ne peuvent pas donner d'explication sur la raison de la réussite ou de l'échec. Si le but est de déterminer comment – et pas combien – l'étudiant a bien appris, alors on pourrait mettre en place des procédures d'évaluation qui reflètent l'entièreté (la panoplie) de nos buts éducatifs (ex : Fink 2003). Ce n'est pas pour autant qu'il faut éliminer les tests « papier-crayon » et les choix multiples, nous les utilisons aussi dans nos classes. Mais nous maintenons qu'il faudrait réfléchir à un plus large panel de méthodes d'évaluation pour non seulement évaluer les étudiants mais aussi l'efficacité des éducateurs. Ces méthodes incluent des évaluations formelles (recherches, expériences au labo, examen oral, présentation orale) et informelles (observation du comportement de l'étudiant, sa participation aux activités, ses interventions) (Hassard, 2005 ; Feller and Lotter, 2009). Notre but ici n'est pas de présenter des meilleurs outils pour évaluer ou de donner les meilleures méthodes. C'est plutôt de partager notre expérience et de motiver le lecteur à penser à l'évaluation, sa valeur, sa portée et son efficacité pour un meilleur apprentissage. Les pratiques devraient varier en fonction du but poursuivi, du nombre d'étudiants, de leur pré-requis et la disposition de la classe. L'efficacité de l'évaluation peut être améliorée en utilisant plusieurs méthodes pour évaluer une même notion.

Avec des classes nombreuses, les méthodes d'évaluation autres que les choix multiples ou les tests requérant une réponse courte sont plus difficiles à mettre en place, mais il y a moyen d'utiliser des questions à choix multiples comme évaluation active. Selon Fink (2003), chaque semaine, un test à choix multiples est proposé aux étudiants qui le complètent d'abord de façon individuelle ensuite, après avoir récolté les tests, les étudiants refont le même test mais par équipe de 3 ou 4. L'équipe doit trouver un consensus pour chaque question. Pour un feedback direct, nous donnons à chaque équipe une feuille avec un correctif (les réponses sont cachées comme pour un billet de Lotto à gratter – voir www.epsteineducation.com/multiplechoice.php). Les étudiants grattent leur réponse choisie pour vérifier si c'est correct (une étoile apparaît) ou incorrect (un carré blanc apparaît). De cette façon, les étudiants réévaluent leur compréhension et sont encouragés à communiquer leurs idées dans un environnement moins stressant et plus collaboratif. Nous gardons les mêmes équipes pendant un semestre. Pour initier une saine compétition, nous notons le nombre de points gagnés par chaque équipe chaque semaine (basé sur le nombre de réponses correctes), et l'équipe gagnante est invitée à une pizza party à la fin du semestre.

Un autre outil que nous utilisons est un journal dans lequel les étudiants évaluent leurs connaissances. Nous avons d'abord essayé l'approche plus traditionnelle en l'utilisant comme un journal de laboratoire mais les étudiants n'ont pas accroché, les journaux sont devenus des collections d'informations plutôt qu'une réflexion sur l'apprentissage. Les étudiants ont par contre bien réagi lorsqu'on a proposé des blogs de réflexion sur le Web. Chaque étudiant crée un blog (par exemple sur www.blogger.com), un média qui leur semble plus familier et facile. Chaque semaine, les étudiants répondent à des questions guidées qui leur permettent d'utiliser les nouvelles notions, d'identifier leurs faiblesses, de se poser des questions et d'identifier les aspects moins utiles des notions vues. Seuls les instructeurs ont accès aux blogs et ils fournissent un feedback chaque semaine à chaque étudiant. Ces blogs de réflexion fournissent aux instructeurs un feedback immédiat qui peut être utilisé pour aligner les stratégies d'apprentissage avec les cours et connaître le niveau de compréhension des étudiants. Cette méthode encourage les étudiants à penser de façon critique (à propos de la matière) après chaque leçon et leur permet de s'évaluer au fur et à mesure des cours et plus seulement à la fin des cours.

LECTURES RECOMMANDEES

Hassard, J. 2005. The Art of Teaching Science. Oxford University Press, 476 pp.

Feller, R.J., and C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. Oceanography 22(1):234–237. Available online at: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accessed August 12, 2009).

Fink, L.D. 2003. Creating Significant Learning Experiences: An Integrated Approach to Designing College Courses. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 320 pp.

CHAPITRE 4. CHALEUR ET TEMPÉRATURE

BUT DES ACTIVITES

Il faut une bonne connaissance des principes physiques qui sous-tendent la thermique pour comprendre le fonctionnement des océans et leur action sur le climat. Alors même que la plupart des étudiants possèdent une bonne approche empirique de la thermique, celle-ci se mélange souvent à un fatras de préjugés et de lieux communs enchevêtrés et difficiles à clarifier. Une confusion classique consiste à confondre chaleur et température ce qui porte, par exemple, à penser que tout transfert de chaleur mène nécessairement à une augmentation de température ce qui s'oppose à l'idée de chaleur latente. Une autre idée préconçue confond flux maximum de chaleur et température maximale ; il existe, par exemple, un délai entre le moment où la Terre reçoit le plus de chaleur et celui où sa température est au plus haut ; de même, dans l'année, les océans ou les lacs ne sont pas au plus chaud quand le flux de chaleur est maximal. Cet ensemble d'activités a pour but de passer en revue les différents concepts de la thermique pour ensuite les appliquer aux processus océaniques. Comme le sujet est vaste, nous nous limiterons volontairement à l'étude de la propagation de la chaleur (conduction, convexion et rayonnement), à la notion de chaleur latente et aux dilatations thermiques. Ces activités devraient couvrir environ deux leçons.

CONTEXT ET NOTIONS DE BASE

La ***température*** est une grandeur qui indique si un objet est chaud ou froid relativement à une valeur de référence. Sa valeur est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des atomes et molécules de la substance qui le compose. L'échelle de température habituelle est l'échelle Celsius (°C) qui est définie par les propriétés physiques de l'eau pure. Son point de solidification au niveau de la mer (ou point triple) est arbitrairement fixé à 0°C et son point d'ébullition est fixé à 100 °C. L'échelle Fahrenheit (°F) place les mêmes repères à 212 °F pour l'ébullition et 32 °F pour la solidification. Vous pouvez convertir les degrés Fahrenheit (°F) en Celsius (°C) en retranchant 32 avant de multiplier le résultat par 5/9 (°C = [°F – 32] x 5/9). L'échelle Kelvin ou échelle internationale donne la température absolue dont le point 0 est fixé à -273,16 °C (on ainsi K = °C + 273,16). La température est toujours mesurée de façon indirecte c'est-à-dire en mesurant ses effets sur certains matériaux. Ainsi, les thermomètres les plus courants indiquent la variation de volume d'un liquide (leur réservoir est rempli d'alcool coloré ou de mercure) ou les changements de résistance électrique d'une substance (les thermistors à résistance en céramique).

La ***chaleur*** est un transfert d'énergie interne (cinétique et potentielle) d'une substance à une autre. Ce transfert s'opère toujours dans le même sens : depuis la substance la plus chaude vers celle qui l'est moins. Toutefois cela ne signifie pas que la chaleur soit nécessairement transportée depuis la substance possédant la plus grande énergie interne vers celle qui en a moins puisque la température n'est pas directement proportionnelle à cette énergie interne (elle est proportionnelle à l'énergie cinétique). D'autre part la conservation de l'énergie implique que l'énergie reçue par le corps le plus froid est égale à celle cédée par le plus chaud. La chaleur se mesure comme une énergie c'est-à-dire en joules (J). La C*alorie* (ou kilocalorie), une ancienne unité de mesure de chaleur encore utilisée en diététique, vaut 4180 J. Des substances différentes ont généralement des capacités calorifiques différentes ce qui signifie qu'elles stockent des quantités d'énergie différentes pour la même température.

La ***capacité thermique*** d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire à élever sa température d'1 °C. La ***chaleur massique*** (parfois appelée chaleur spécifique) *Qs* est la capacité thermique par unité de masse. L'eau possède une des capacités thermiques les plus élevées parmi tous les liquides : *Qs* = 4186 J/(kg°C) (= 1000 calories/kg°C). La capacité thermique de l'air est environ un quart de celle de l'eau : *Qsair* = 1006 J/(kg°C). Cette différence au niveau thermique est d'autant plus importante que la densité de l'air est environ 1000 fois plus faible que celle de l'eau. Ainsi, pour un même volume d'air ou d'eau et pour une même élévation de température d'1 °C, il faut environ 4000 fois plus d'énergie calorifique pour l'eau que pour l'air. De même lorsque de l'eau refroidit, elle relâche 4000 fois plus d'énergie thermique que le ferait le même volume d'air en refroidissant de la même manière (voir la vidéo sur la différence de capacité thermique entre l'air et l'eau sur http://www.jpl.nasa.gov/video/index.cfm?id=827). La chaleur massique de l'eau est également beaucoup plus élevée que celle du sol et de la roche. La valeur élevée de la chaleur massique de l'eau signifie que les océans sont capables d'absorber ou de relâcher des quantités considérables de chaleur pour des variations de température plutôt faibles par rapport à celles de l'atmosphère et des continents. Les océans servent ainsi de tampon, de volant thermique qui permet de modérer les variations de

température de la planète. Cet effet modérateur explique pourquoi les bords de mer voient peu d'écarts de température entre le jour et la nuit ou entre saisons alors que les régions à l'intérieur des terres voient ces mêmes écarts augmenter.

Comme le flux d'énergie solaire sur la planète varie fortement avec la latitude, des différences de température importantes caractérisent des latitudes différentes. Les océans jouent ici un rôle clé dans la modération de ces différences, non seulement en relâchant ou en absorbant de grandes quantités d'énergie de par leur grande capacité thermique mais aussi en transportant l'énergie thermique des zones équatoriales plus chaudes vers les zones polaires plus froides. C'est là l'action des courants marins tels que le Gulf stream. Sans les échanges thermiques via les courants marins et les vents, les différences de température entre les latitudes seraient significativement plus élevées. Les mécanismes par lesquels la chaleur peut être transportée sont discutés plus en détail ci-dessous de même que les activités proposées pour les mettre en évidence.

Les mécanismes du transport de chaleur

Chaque fois qu'il existe une différence de température entre deux objets, de la chaleur est transportée de l'un à l'autre par rayonnement, convexion et conduction. En général, ces différents modes de propagation de la chaleur coexistent.

Le ***rayonnement*** décrit comment l'émission d'ondes électromagnétiques peut transporter l'énergie thermique jusqu'aux corps qui les absorbent. Tous les corps émettent et absorbent l'énergie de cette façon mais le taux d'absorption dépend des propriétés du matériau ainsi que de la géométrie de la surface interagissant avec le rayonnement (voir l'activité 4.1). Si à un moment donné, le taux d'absorption de l'énergie incidente est supérieur à l'énergie émise, la température de cet objet va augmenter (s'il n'y pas d'autres pertes d'énergie thermique). A l'inverse, si l'émission est plus importante que l'absorption, l'objet se refroidit. L'équilibre thermique est donc la situation dans laquelle les taux d'énergie absorbée et émise sont égaux. La quantité et le type d'énergie rayonnée (longueur d'onde) ne dépendent en réalité que de la température de l'objet. Le modèle qu'on utilise pour fixer la relation entre la température d'un corps et l'énergie qu'il rayonne est celui du « corps noir ». Par définition, un corps noir absorbe l'intégralité (100 %) des rayonnements électromagnétiques qui baignent sa surface ; comme aucun rayonnement qui le frappe n'est réfléchi ou transmis, l'objet paraît noir. L'énergie E rayonnée par mètre carré de la surface d'un corps noir est directement proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue (en kelvin) : $E = \sigma T^4$ où $\sigma = 5{,}7 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4} (loi de Stefan-Boltzmann). Cette loi implique que si la température absolue d'un corps double, la quantité de chaleur qu'il rayonne est multipliée par 16.

Le rayonnement émis n'est jamais monochromatique, les longueurs d'onde présentes couvrent généralement tout un spectre de valeurs. Le sommet de ce spectre (c'est-à-dire la longueur d'onde dont l'intensité rayonnée est la plus élevée) est inversement proportionnel à la température (loi de Wien). Il s'ensuit que la longueur d'onde principale d'un rayonnement thermique diminue lorsque la température augmente. Dans le cas du Soleil, par exemple, le transfert d'énergie vers la Terre ne se fait que par rayonnement et comme la température de sa surface est 6000 K, la longueur d'onde principale est dans la partie visible du spectre et assez courte. La Terre et son atmosphère émettent elles aussi un rayonnement mais comme leur température est bien plus basse que celle du Soleil (~ 300 K), la longueur d'onde principale de cette émission est plus élevée : c'est l'infrarouge. Ces idées sont essentielles pour comprendre ce qu'on appelle l'effet de serre. L'atmosphère terrestre est à peu près transparente pour les courtes longueurs d'onde émises par le Soleil ou réfléchies par le sol mais pas pour le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par le sol et l'atmosphère. Ainsi, l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la surface de la Terre et y est absorbée par le sol et les océans. Par contre, l'énergie rayonnée en retour par la surface est de longueur d'onde élevée et par conséquent absorbée par les gaz de l'atmosphère. Ceux-ci agissent donc un peu comme un couverture pour la planète[1].

La ***conduction*** désigne le transport de chaleur qui a lieu entre deux objets de température différente et physiquement en contact l'un avec l'autre. Dans ce cas, l'énergie est transmise par les

[1] Il faut distinguer l'effet de serre atmosphérique de celui de la serre de jardin. En effet, une serre horticole permet d'accumuler la chaleur essentiellement parce que la convexion vers l'extérieur y est limitée et non pas par une absorption du rayonnement infrarouge par l'air de la serre. Une autre erreur commune est de considérer l'effet de serre comme essentiellement toxique alors que sans cette contribution, notre planète serait simplement frigorifiée. Les activités générées par l'homme moderne ont cependant considérablement augmenté l'effet de serre naturel en produisant un accroissement supplémentaire de la température.

vibrations et les collisions des molécules. Comme les molécules d'un objet chaud vibrent plus fort que celle d'un objet froid, le contact entre les deux permettra un transfert d'énergie des molécules les plus rapides vers les plus lentes à travers les collisions multiples entre elles. Le taux de transfert d'énergie par conduction est proportionnel à la surface de contact et au gradient de température entre les deux objets. Ce taux dépend également de la conductivité thermique des matériaux utilisés c'est-à-dire de leur capacité à conduire la chaleur.

La ***convection et l'advection*** sont les types de transport thermique principaux au sein des océans et de l'atmosphère. La convection n'a lieu que dans les fluides et se caractérise par des mouvements verticaux d'ensemble, les flux, plutôt que des mouvements et interactions au niveau moléculaire. Ces mouvements de convexion sont produits par des différences de température qui génèrent à leur tour des différences de densité c'est-à-dire de flottabilité. Voici quelques exemples de processus convectifs : les courants dans le manteau terrestre qui produisent la dérive des continents résultent des différences de température au sein du magma ; la circulation atmosphérique résulte des inégalités de l'éclairement solaire (entre pôles et équateur, par exemple) ; la grande ceinture des courants marins résulte du refroidissement des eaux de surface aux hautes latitudes ; et le mélange vertical entre l'eau de surface et celle des profondeurs au voisinage de la surface des océans est dû aux différences de température entre le jour et la nuit. L'advection décrit les transferts de chaleur liés à des mouvements horizontaux du fluide (comme pour le Gulf stream, par exemple).

Chaleur latente

Quand un objet reçoit de l'énergie thermique, deux phénomènes différents peuvent se passer : soit la température augmente, soit la substance change d'état sans modification mesurable de température (comme lorsque la glace fond dans l'eau, par exemple). La grande majorité des matériaux possèdent deux changements de phase distincts : le passage du solide au liquide et celui du liquide au gaz. La chaleur nécessaire au changement d'état d'une substance est appelée ***chaleur latente de fusion*** quand on passe du solide au liquide et ***chaleur latente de vaporisation***, du liquide au gaz. Pour l'eau (H_20), ces chaleurs latentes sont élevées (environ 334 J/s et 2260 J/g respectivement). Ces valeurs élevées ont elles aussi de nombreuses conséquences sur le climat de notre planète comme par exemple :

(1) Lorsque l'eau des régions polaires gèle en hiver, la chaleur latente correspondante est libérée dans l'atmosphère et dans l'océan. En été, lorsque la glace fond, de la chaleur est extraite de l'océan et de l'atmosphère. Comme ces changements d'état ne produisent pas de changement de température, les variations saisonnières de la température des océans et de l'air de ces régions sont assez faibles. Pensez ainsi aux quelques glaçons qui permettent de garder une boisson fraîche. C'est seulement lorsque les glaçons auront fondu que la température de la boisson se mettra à augmenter.

(2) La vapeur d'eau qui s'évapore des océans apporte de la chaleur latente à l'atmosphère. Cette chaleur est libérée lors de la condensation de l'eau en nuages ce qui réchauffe l'atmosphère. L'évaporation est ainsi la raison principale pour laquelle la température des lacs et des océans ne peut guère dépasser 28-30°C.

Le corps humain, lui aussi, prend avantage de la valeur élevée de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, même une petite quantité d'eau qui s'évapore peut rafraîchir le corps de façon substantielle : c'est ce qui se passe quand nous transpirons. L'eau qui s'évapore emprunte l'énergie nécessaire à la peau ce qui permet de réduire l'augmentation de température du corps. Le même phénomène explique pourquoi on frissonne lorsqu'on sort, trempé, d'une piscine, alors qu'il fait chaud. Une erreur assez répandue consiste à croire qu'il faut porter l'eau jusqu'à 100 °C pour qu'elle s'évapore alors que tout le monde sait qu'en suspendant une serviette de bain, elle sèche naturellement à température ambiante. Dans un liquide, les molécules se déplacent au hasard à des vitesses très variables ce qui fait qu'au cours des multiples collisions certaines d'entre elles perdent de l'énergie cinétique tandis que d'autres en gagnent. Certaines molécules peuvent ainsi acquérir une énergie cinétique suffisante pour s'extraire du liquide et participer au gaz qui l'entoure. Les molécules qui restent piégées dans le liquide sont ainsi nécessairement plus lentes. Ceci explique comment l'évaporation, soit la fuite des molécules les plus rapides, implique que l'énergie cinétique moyenne des molécules appartenant au liquide diminue et qu'il en va de pair pour la température du liquide. De même lorsqu'on chauffe un liquide, on augmente l'énergie cinétique moyenne des molécules ce qui permet à davantage de molécules de quitter le liquide, renforçant ainsi l'évaporation. L'évaporation peut aussi affecter l'état solide (lorsqu'elle est massive, on l'appelle sublimation) comme on peut l'observer en hiver lorsque la neige « disparaît » alors que la température reste bien en-dessous de 0°C.

Dilatation thermique

La plupart des substances augmentent de volume lorsqu'on les chauffe et se contractent quand on les refroidit. En effet, une augmentation de température traduit une intensification des mouvements moléculaires qui mène généralement à une

augmentation de la distance moyenne les séparant : l'ensemble occupe ainsi un volume plus grand. Inversement, lorsqu'on refroidit un corps, ses molécules vibrent moins et se rapprochent les unes des autres. Il faut pourtant remarquer une exception importante, l'anomalie de l'eau : entre 0°C et 4 °C, l'eau douce se dilate lorsqu'on la refroidit. Le principe de fonctionnement des thermomètres à liquide repose sur celui de la dilatation thermique. C'est encore la dilatation thermique des océans qui justifie une partie importante de l'augmentation du niveau de mer sur une échelle de temps allant de la dizaine à la centaine d'années. Cependant les effets thermiques sur l'océan paraissent plutôt réglés sur des fluctuations climatiques à l'échelle de la dizaine d'années de sorte qu'il est malaisé de prédire l'évolution du niveau des mers à plus long terme (Lombard et al., 2005). Les estimations actuelles suggèrent que la dilatation thermique seule est responsable de 25 à 50% de l'élévation du niveau des mers.

DESCRIPTION DES ACTIVITÉS

On commence en demandant aux étudiants de proposer des définitions de la chaleur et de la température; en général cela se passe en petits groupes de 3 ou 4. Ensuite, tout le monde se réunit pour discuter leurs définitions et passer en revue les mécanismes de transport de la chaleur (comment la chaleur "passe-t-elle" d'un corps à l'autre?). On passe ensuite à des approches plus expérimentales et actives, pour explorer les idées d'absorption et d'émission de chaleur (activité 4.1), de transfert de chaleur (activités 4.1-4.3), de chaleur latente de fusion ou de solidification (activités 4.4 et 4.5), ainsi que la relation entre évaporation et température (activité 4.6), et la dilatation thermique (activités 4.7 et 4.8). Pendant ces travaux et les sessions de discussion en classe, nous communiquons les principes qui sous-tendent ces concepts et nous illustrons leur signification dans les processus océaniques et climatiques.

ACTIVITÉ 4.1. TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT ET ABSORPTION DE RAYONNEMENT (Figure 4.1)

Matériel

- Deux canettes de la même taille, l'une recouverte de noir mat et l'autre polie et brillante (couvercle percé d'un trou au-dessus par lequel on fera passer un thermomètre)
- Deux thermomètres
- Une ampoule à incandescence (nous avons utilisé une ampoule blanche de 150W)

Remarque: un "kit rayonnement" complet est disponible via le site sciencekit.com

Instructions pour les étudiants

1. Vous aves deux boîtes: l'une brillante et l'autre noire. Si la même source de lumière éclaire les deux boîtes, est-ce que la température sera la même à l'intérieur de ces deux boîtes? Pourquoi, ou pourquoi pas?
2. Notez la température initiale des thermomètres insérés dans les boîtes.
3. Assurez-vous que les deux boîtes soient à la même distance de la source de lumière. Allumez la lampe et observez les thermomètres. Que voyez-vous? Comment pouvez-vous expliquer vos observations? Comment la chaleur se transmet-elle dans ce système?
4. Si la lampe reste allumée pendant un temps très long, la température des boîtes continuera-t-elle à augmenter tant que la lampe est allumée? Pourquoi, ou pourquoi pas? Par quel(s) moyens(s) la chaleur se transmet-elle dans ce système?
5. Comment croyez-vous que les principes appris dans cette expérience s'appliquent à l'absorption du rayonnement électromagnétique à la surface de la Terre et à la régulation de la température de la Terre?

On peut modifier ce dispositif (p. ex. pour s'en servir comme d'un instrument d'évaluation) en comparant une boîte pleine d'eau avec une boîte vide, ou en utilisant un ventilateur pour renforcer la diffusion par convection (Prudence! L'eau ne doit pas toucher la lampe.).

Explication

Bien que les deux boîtes soient exposées à la même source de lumière, les deux thermomètres ne montrent pas la même température (Figure 4.1). La boîte brillante réfléchit plus

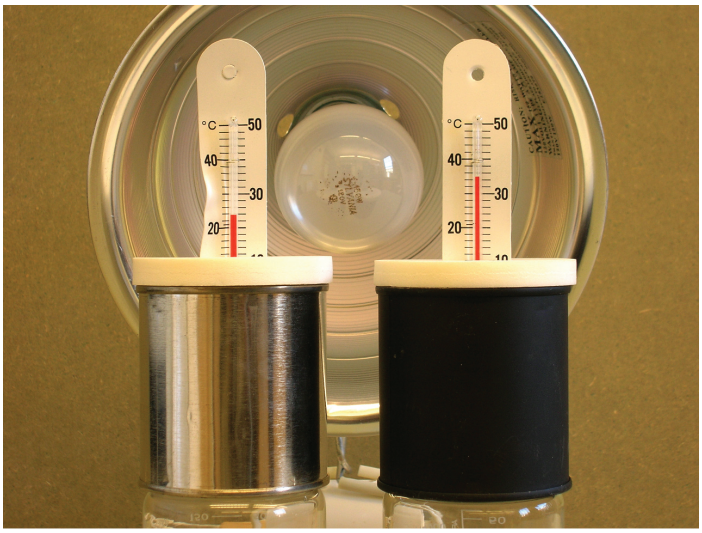

Figure 4.1. Matériel pour l'activité 4.1. Suivant l'éclairage de la boite brillante et la boîte noire les thermomètres montrent une température différente.

d'énergie de rayonnement que la boîte noire, et donc elle absorbe moins de chaleur. La boîte noire se réchauffera plus vite. Les températures des boîtes ne vont pas monter indéfiniment: elles vont atteindre un niveau final stable, lorsque les gains de rayonnement reçu en ondes plus courtes seront compensés par les pertes de rayonnement émis en ondes plus longues plus la perte de chaleur vers l'air ambiant, par conduction.

ACTIVITÉ 4.2. CONDUCTION (Figure 4.1)

Matériel

- Trois matériaux différents (bois, métal, textile), chacun à la température ambiante.

Instructions pour les étudiants

1. Les trois matériaux ont été soumis à la température ambiante pendant un bon moment. Sans les toucher, prédire leurs températures. Nous donneront-ils des sensations pareilles ou différentes, en ce qui concerne la température? Pourquoi, ou pourquoi pas?
2. Posez la main sur chaque matériau pendant un bref instant. Correspond-il à votre attente? Comment expliquer vos observations, compte tenu du fait que tous ces objets ont été soumis à la température de la pièce?
3. Que montrent vos observations en ce qui concerne la sensation de température telle que perçue par le système nerveux humain (et pour d'autres organismes)?
4. Quand et où pensez-vous que la conduction joue un rôle dans l'océan?

Explication

Quand vous touchez quelque chose qui est plus chaud ou plus froid que votre peau, vous faites l'expérience du transfert de chaleur par conduction. Les matériaux à la température ambiante qui sont de bons conducteurs de chaleur (p. ex. un morceau de métal) sont plus froids au toucher, parce que votre chaleur sera transmise rapidement, ce qui empêchera la zone de contact de monter à la température de votre main. Les mauvais conducteurs de chaleur (p. ex. un morceau de vêtement) peuvent se réchauffer localement, et donc sont plus chauds au toucher, parce que la chaleur de votre main sera transmise plus lentement. De manière générale, les solides sont meilleurs conducteurs que les liquides, et les liquides meilleurs conducteurs que les gaz. Les métaux sont de très bons conducteurs de chaleur, tandis que l'air et la graisse (p. ex. de baleine) sont de très mauvais conducteurs. Un carrelage est plus froid au toucher qu'un tapis, bien qu'ils soient tous deux à la température ambiante. Le carrelage est un meilleur conducteur que la laine, et donc la chaleur se transmet plus vite sur un carrelage que sur une carpette. La conduction n'est pas un processus important de transmission de chaleur dans l'océan. En revanche, la conduction joue toujours un rôle à l'interface entre des matériaux dont les propriétés sont différentes (p. ex. liquide/solide, comme dans le cas des organismes marins en contact avec l'eau ambiante; ou liquide/gaz, comme dans le cas des échanges océan/atmosphère).

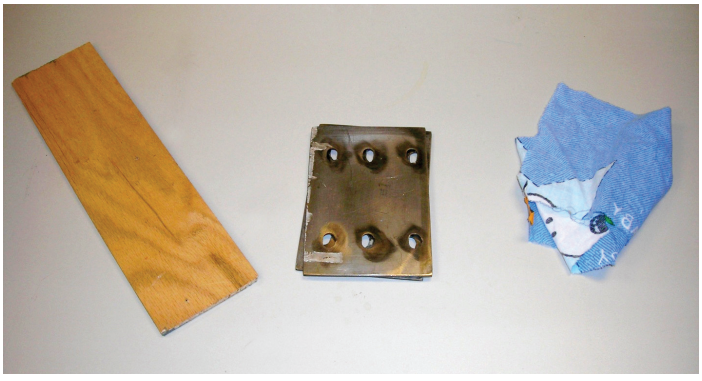

Figure 4.2. Matériel pour l'activité 4.2.

ACTIVITÉ 4.3. CONVECTION (Figure 4.3)

Matériel

- Dispositif de convection (fabriqué sur place ou préfabriqué, cf. Sciencekit.com)
- Colorants alimentaires (deux couleurs)
- Un bac d'eau glacée
- Un bac d'eau chaude

Instructions pour les étudiants

1. Remplir l'appareil d'eau (Assurez-vous qu'il n'y a pas de bulles d'air dans les tubes horizontaux)
2. Si vous réchauffez la colonne de droite et refroidissez la colonne de gauche, dans quelle direction vous attendez-vous à voir couler l'eau dans les tubes horizontaux?
3. Plongez la colonne de droite dans le bac à eau chaude, et la colonne de gauche dans l'eau glacée. Versez quelques gouttes de colorant dans les deux colonnes pour les distinguer, et regardez si la circulation de l'eau correspond à votre attente.
4. Que se passera-t-il si vous réchauffez (ou refroidissez) seulement une colonne du dispositif? Essayez.
5. Quels processus océaniques ou atmosphériques peut-on illustrer via cette expérience?

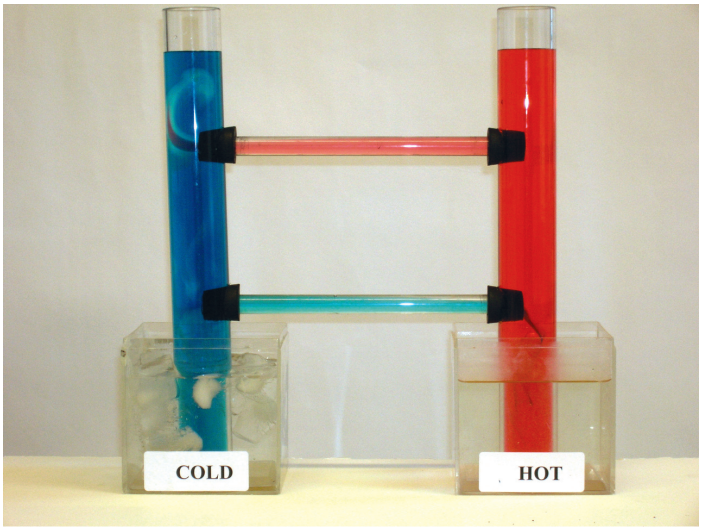

Figure 4.3. Dispositif de convection. Remarquez que l'eau chaude (rouge) circule par le haut tandis que l'eau froide (bleu) circule par le bas dû à la différence de densité entre les deux côtés du dispositif.

Explication

Quand une colonne du dispositif est réchauffée et l'autre refroidie, cela cause des différences de densité entre les bases des tubes verticaux, et donc des gradients de pression. Les différences de densité conduisent des masses d'eau à s'enfoncer ou à monter jusqu'à ce qu'elles atteignent leur niveau de densité d'équilibre; une fois qu'une masse d'eau atteint son niveau de densité d'équilibre, elle commence à se déplacer horizontalement, en réponse à un gradient de pression. (Remarque: les gradients de pression résultent de différences dans les distributions verticales de densité, et donc de pression hydrostatique, entre des régions où l'eau est plus ou moins dense). L'eau froide est plus dense, et va donc envahir le tube horizontal inférieur; l'eau chaude va envahir le tube supérieur (Figure 4.3). Si on réchauffe ou refroidit une seule colonne, on constate le même effet, mais il sera sans doute moins spectaculaire, parce que les gradients de pression seront plus faibles. Cette expérience donne un bon exemple de la circulation d'eau dans les océans provoquée par les contrastes de densité, comme le "grand tapis roulant" de la circulation thermohaline. Il est important, comme dans tout travail sur modèle, d'attirer l'attention des étudiants sur les limites d'une analogie, pour éviter les erreurs. Dans la circulation thermohaline des océans, le refroidissement se produit à la surface, tandis qu'ici les bacs d'eau glacée et chaude sont à la base des tubes (On notera que l'atmosphère, elle, est chauffée par-dessous, et que donc la circulation des courants atmosphériques est une meilleure analogie). Cette activité peut être mise en œuvre en rapport avec le Chapitre 1.

ACTIVITÉ 4.4. POCHETTE À CHALEUR (Figure 4.4)

Matériel

- Deux pichets d'eau
- Une pochette à chaleur réutilisable (cf. Arbor scientific) à la température ambiante
- Deux thermomètres
- Une montre ou un chronomètre

Remarque: Nous utilisons cette expérience pour des démonstrations devant toute une classe. Si vous voulez la faire effectuer par plusieurs groupes, il vous faudra plusieurs pochettes à chaleur (elles sont bon marché). Une fois qu'une pochette à chaleur a été activée, et que le matériau qui s'y trouve s'est solidifié, il faudra lui rendre de la chaleur (20 minutes) pour le ramener à l'état liquide.

Instructions pour les étudiants

1. Regardez, touchez et décrivez la pochette à chaleur (matériau, température...)
2. Versez dans les pichets de l'eau à température ambiante, et notez leur température initiale.
3. Activez la pochette à chaleur en pressant le petit bouton (employez le bout du doigt, pas l'ongle, pour ne pas endommager la pochette), et plongez-la dans un des pichets. L'autre pichet servira de référence de contrôle.
4. Notez sans retard la température de départ dans les deux pichets.
5. Notez ces températures toutes les minutes, sur 10 minutes.
6. Observez-vous des différences de température entre les deux pichets? Quelle en est la cause? Comment fonctionne la



Figure 4.4. Matériel pour l'activité 4.4.

pochette? (Suggestion: Est-ce que le matériau dans la pochette a la même apparence avant et après l'activation de la pochette?)
7. Quels processus océaniques et atmosphériques sont analogues à ce que vous venez d'observer ici (un changement d'état suivi par un changement de température dans l'eau ambiante)?

Explication

Quand une pochette à chaleur activée est plongée dans l'eau, la température de l'eau monte. En revanche, dans le pichet de référence (sans pochette à chaleur) la température reste constante. La pochette à chaleur contient une solution sursaturée d'acétate de sodium dans de l'eau. Après l'activation, un centre de nucléation de solidification apparaît, et l'acétate de sodium commence à cristalliser, libérant, sous forme de chaleur, l'énergie stockée à l'état liquide. La chaleur diffusée est transmise à l'eau du pichet, et des mouvements de liquide (convection, advection) distribuent la chaleur dans l'eau du pichet. Pour ramener le contenu de la pochette à l'état liquide, il faudra chauffer (c.-à-d. investir de l'énergie). Cette expérience montre la libération de chaleur qui accompagne certains changements d'état. On peut la discuter en classe dans le contexte de la chaleur latente libérée pendant la formation de glace et la condensation des nuages.

ACTIVITÉ 4.5. FLUX DE CHALEUR ET CHALEUR LATENTE (Figure 4.5)

Matériel

- Un flacon de plastique muni d'un couvercle. Le flacon doit être assez petit pour entrer dans un gobelet en polystyrène expansé. Creusez un trou dans le couvercle du flacon pour y faire passer un thermomètre.
- Quelques gobelets en polystyrène expansé, glissés les uns dans les autres pour une meilleure isolation. Marquer une ligne dans le gobelet intérieur, pour vous assurer que le volume d'eau dans le flacon correspond à celui de l'eau dans le gobelet.
- Deux thermomètres digitaux
- Une potence-support avec un dispositif de fixation
- Eau courante chaude, eau glacée, glace

Instructions pour les étudiants

1. Esquissez un croquis du dispositif expérimental (Figure 4.5), et indiquez à l'aide de flèches la direction du transfert de chaleur dans le cas où le flacon contient de l'eau glacée (sans glace), tandis que le gobelet contient de l'eau chaude. Comment évolue la température de l'eau dans le flacon? Et dans le gobelet?
2. Remplissez à ras bords le flacon d'eau glacée (pas de glace!). Notez la température initiale de l'eau dans le flacon. Suspendez le flacon à la potence.
3. Remplissez le gobelet intérieur d'eau chaude jusqu'à la ligne (le volume d'eau dans le flacon est égal à celui de l'eau dans le gobelet). Notez la température initiale de l'eau dans le gobelet.
4. Déplacez le bras de la potence pour plonger le flacon dans l'eau chaude du gobelet. Notez la température dans le flacon et dans le gobelet toutes les 30 secondes pendant 4 minutes. Utilisez la tige des thermomètres pour mélanger l'eau dans le gobelet et dans le flacon, pour éliminer les gradients de température (cela revient à empêcher l'eau chaude, moins dense, de surnager et de s'accumuler au-dessus de l'eau froide, plus dense).
5. Notez les températures dans le flacon et dans le gobelet en fonction du temps. Vos observations confirment-elles votre prédiction? Quel sera, à votre avis, le gradient de température après un temps plus long?
6. Supposez que vous répétez l'expérience, mais cette fois avec un mélange eau + glace dans le flacon, et que vous remplissez le gobelet avec de l'eau chaude (Ne faites rien pour le moment!). Vous attendez-vous aux mêmes variations de température dans ces conditions? Pourquoi, ou pourquoi pas?
7. Remplissez à ras bords le flacon d'eau et de glace (à peu près 60% de glace et 40% d'eau glacée). Notez la température initiale de l'eau dans le flacon.
8. Reprenez les étapes 4 et 5. Observez-vous la même tendance que la première fois? Pourquoi, ou pourquoi pas?



Figure 4.5. Arrangement du matériel pour l'activité 4.5.

Explication

La chaleur se transmet par conduction depuis un corps à température élevée vers un corps à température basse. Dans cette expérience, la chaleur se transmet de l'eau chaude du gobelet vers l'eau froide du flacon plongé dans le gobelet. Par la suite, la température de l'eau du gobelet baisse (perte de chaleur) tandis que la température de l'eau du flacon monte (gain de chaleur). Après un temps long, le système atteindra son équilibre, et il n'y aura plus de gradient de température entre l'eau du gobelet et celle de l'eau du flacon. Mais si on met un mélange eau + glace dans le flacon et de l'eau chaude dans le gobelet, le transfert de chaleur se fera dans la même direction que la première fois, mais ici, au début de la baisse de température de l'eau chaude du gobelet, on n'observera pas de hausse de température dans le mélange eau + glace (parce que la chaleur reçue est d'abord investie pour la fusion de la glace). Ce ne sera qu'après la fusion de la glace que la température de l'eau du flacon commencera à monter.

ACTIVITÉ 4.6. PSYCHROMÈTRE À FRONDE, HYGROMÈTRE (Figure 4.6)

Matériel

- Un psychromètre à fronde (Sciencekit.com)

Instructions pour les étudiants

1. Un psychromètre à fronde est un appareil qui permet de mesurer l'humidité relative en comparant la température d'un thermomètre "mouillé" (dont le globe-réservoir est enveloppé dans une gaze mouillée) avec celle d'un thermomètre sec. Comment pensez-vous que la température varie entre les deux thermomètres en fonction de l'humidité? Pourquoi pourrait-il y avoir une différence entre ces deux mesures?
2. Faites tourner le psychromètre pendant 20 secondes, et notez la différence éventuelle entre les deux thermomètres. (Nous demandons aux étudiants de prendre au moins trois mesures et de prendre la valeur moyenne). Nous utiliserons ces données plus tard pour une discussion sur la prise de mesures.

Après le travail, on demande aux étudiants de discuter le concept d'humidité et de décrire les relations qu'ils s'attendent à observer entre l'humidité (air plus ou moins étouffant), l'évaporation et la température ambiante. Les étudiants devraient ensuite être capables d'expliquer (si possible d'évaluer) l'usage du psychromètre pour déterminer l'humidité pour une température ambiante donnée (comme le permet une table fournie par le fabricant, cf. Figure 4.6).

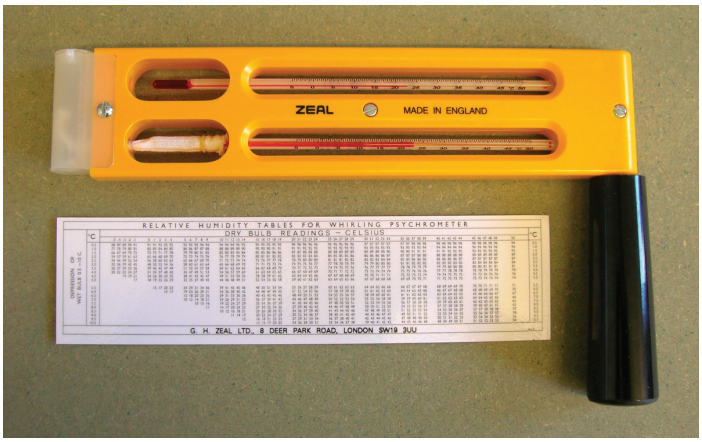

Figure 4.6. Un psychromètre à fronde et sa table to conversion.

Explication

Le psychromètre à fronde consiste en deux thermomètres montés ensemble. Le premier est un thermomètre ordinaire; le second est un thermomètre mouillé (un petit tissu de gaze humide entoure le globe-réservoir). Si on fait tourner le système, l'eau s'évapore sur le textile au contact de l'air, ce qui refroidit le thermomètre mouillé. La température du thermomètre mouillé atteindra l'équilibre lorsque le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau (évaporation qui dépend de l'humidité relative ambiante) est en équilibre avec le gain de chaleur reçue par conduction de l'air ambiant. Plus l'air ambiant est sec, plus l'évaporation sera forte, et plus grande sera la différence de température entre les deux thermomètres. Si l'air ambiant est saturé de vapeur d'eau, il n'y aura pas d'évaporation et donc pas de refroidissement, et la différence de température entre les deux thermomètres sera nulle.

ACTIVITÉ 4.7. EXPANSION THERMALE (Figure 4.7)

Matériel

- Un flacon
- Un bouchon percé
- Un long tube de verre
- Un pichet d'eau chaude.
- Colorant alimentaire
- Papier collant pour marquage

Instructions pour les étudiants

1. Remplissez le flacon d'eau colorée. Enfoncez le bouchon jusqu'à ce que le liquide atteigne un niveau situé à environ 1/3 de la hauteur du tube au-dessus du bouchon. Marquez le niveau avec un bout de papier collant.

2. Quelle évolution du niveau de l'eau dans le tube vous attendez-vous à observer si le flacon est plongé dans un pichet d'eau chaude? Pourquoi?
3. Plongez le flacon dans un pichet d'eau chaude. Suivez l'évolution du niveau de l'eau dans le tube pendant au moins 3 minutes. Marquez le nouveau niveau. Cette évolution correspond-elle à votre prédiction?
4. Appliquez ce que vous venez d'apprendre dans cette expérience pour prédire et expliquer l'évolution du volume des océans si leurs eaux se réchauffent. Quelles sont les implications pour le niveau des océans?
5. Quels autres processus influencent le niveau des océans? Défi: La fusion de la glace terrestre (glaciers) et celle de la glace marine (icebergs) auront-elles les mêmes effets sur le niveau des océans? Pourquoi, ou pourquoi pas? Comment mettriez-vous votre prédiction à l'épreuve?

Explication

De manière générale, quand un fluide est chauffé, il se dilate, et quand il est refroidi, il se contracte (il existe des exceptions importantes, par exemple l'eau en-dessous de 4°C). C'est le principe du thermomètre à mercure ou à éthanol. Un réchauffement des océans lié au réchauffement global aura pour effet une dilatation des eaux océaniques, et cette augmentation du volume de l'eau contenue dans les bassins océaniques fera monter le niveau des océans. D'autres processus susceptibles d'influencer le niveau des océans sont par exemple l'ajout d'eau venue de la fusion des glaciers et des calottes glaciaires terrestres, ou la montée et la descente des plaques lithosphériques, en fonction des équilibres isostatiques dans la croûte terrestre. La fusion des glaces océaniques (les icebergs) ne modifie pas le niveau des mers, parce que le volume de l'eau que déplace un iceberg plongé dans l'océan correspond au volume d'eau qu'il donnera à l'océan s'il fond. Pour montrer cet effet, on demandera aux étudiants de plonger un gros bloc de glace dans un bac, et de noter le niveau de l'eau avant et après la fusion de la glace. *Remarque*: un changement de niveau océanique peut aussi se produire si la glace refroidit assez l'eau pour provoquer une contraction significative.



Figure 4.7. Arrangement du matériel pour l'activité 4.7 après l'immersion dans un pichet d'eau chaude.

ACTIVITÉ 4.8. DENSITÉS CONTRARIANTES (Figure 4.8)

Matériel

- Deux pichets en verre, l'un plein d'eau froide (moins de 20°C), et l'autre plein d'eau chaude (environ 40°C)
- Une paire de tiges dites "reverse density", l'une en aluminium, l'autre en plastique (fournisseur: Arbor Scientific)
- Un thermomètre
- Glace
- Plaque chauffante (à défaut, l'eau courante chaude suffira)

Instructions pour les étudiants

1. Que devrait-il arriver aux tiges si on les met dans un pichet d'eau froide: flotter ou couler? Quel est le raisonnement derrière votre prédiction?
2. Mettez les tiges dans le pichet d'eau froide. Assurez-vous que des bulles d'air ne s'y attachent pas.
3. L'observation correspond-elle à vos prédictions? Suivez l'évolution pendant au moins 5 minutes.
4. Reprenez l'expérience avec le pichet d'eau chaude. Suivez l'évolution pendant au moins 3 minutes. Que se passe-t-il?
5. Comment expliquez-vous la différence du comportement des tiges dans l'eau froide et dans l'eau chaude? Discutez diverses explications possibles de ces observations.

Explication

Dans cette expérience, une tige est en aluminium et l'autre en plastique PVC. Si on met les tiges dans l'eau froide à moins de 20°C, elles flottent d'abord toutes deux, puisque leur densité est inférieure à celle de l'eau froide. Avec le temps, la tige de PVC se refroidit et se contracte: sa densité augmente (le volume diminue, mais la masse ne varie pas); quand la densité de la tige de PVC dépasse celle de l'eau, le PVC coule. La tige d'aluminium se refroidit aussi, mais à variation de température égale, l'expansion et la contraction de l'aluminium sont beaucoup plus faibles que celles du PVC (on dit que le coefficient de dilatation thermique de l'aluminium est plus petit). La densité

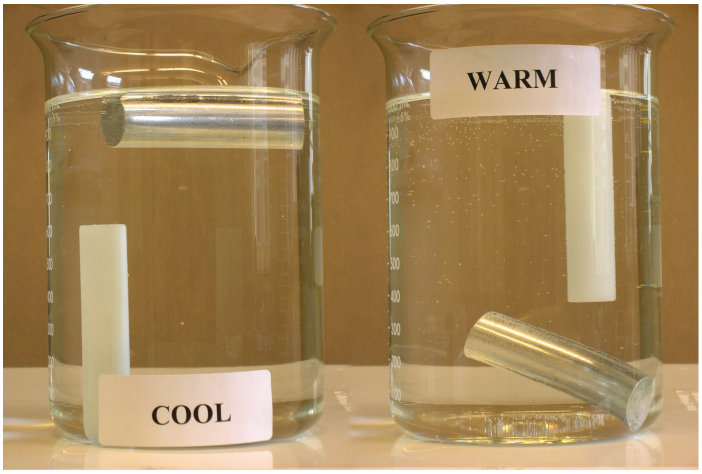

Figure 4.8. Tiges dites d' aluminium, l'autre en plastique.

de la tige d'aluminium est donc moins sensible à la variation de température, et donc la tige d'aluminium continue à flotter après contraction. Si on met les tiges dans l'eau chaude à 40°C, la densité de l'eau est à présent plus faible que celle de l'aluminium, et la tige d'aluminium coule. La tige de PVC est aussi initialement plus dense que celle de l'eau, et elle coule donc d'abord aussi, mais elle se dilate ensuite en se réchauffant: sa densité diminue (la masse ne varie pas, mais le volume augmente); et quand sa densité devient inférieure à celle de l'eau, elle flotte. Cette expérience peut aussi servir dans le Chapitre 1.

ACTIVITÉ SUPPLÉMENTAIRE

Nous avons constaté que de nombreux étudiants confondent l'heure du jour où le rayonnement est maximal (vers midi) et celle où la température est la plus élevée (quelques heures plus tard dans l'après-midi). De même, ils confondent les jours les plus longs ou les plus courts (où le flux solaire entrant est proche des valeurs maximales ou minimales) avec ceux où la température moyenne de l'air ou de l'eau, dans les océans ou les lacs, est la plus haute ou la plus basse (on néglige ici les processus non radiatifs qui affectent la température de l'eau comme les remontées d'eau). Il y a ici confusion entre température et taux de variation de la température. Le taux de variation de la température est proportionnel au flux de chaleur (s'il n'y a pas de transition de phase). Nous proposons donc aux étudiants des activités où ils esquissent un schéma de la correspondance de la température de l'eau avec les saisons de l'année. Ils consultent alors des sites comme www.gomoos.org/gnd/ qui donnent la température de surface des océans en temps réel, pour construire un graphique de la température des eaux de surface en fonction du temps, et voir quand la température de l'eau ou de l'air est maximale. Cette activité peut être proposée comme travail à domicile. En classe, nous discutons la différence entre température et taux de variation de la température associé au flux de chaleur. Par exemple, le flux radiatif de chaleur dans le Maine (et donc le taux de variation de la température) est en moyenne plus faible en décembre et plus fort en juin (mois des jours les plus courts et les plus longs). Mais l'océan et l'atmosphère continuent à perdre de la chaleur après décembre ou à en recevoir après juin, périodes pendant lesquelles le flux radiatif de chaleur n'est plus minimal (ou maximal). La température de l'eau continue donc sa baisse après décembre et sa hausse après juin. Cette évolution de la température n'atteindra un tournant (le passage par le minimum ou le maximum) que lorsque les gains de chaleur compenseront les pertes de chaleur. Dans le Golfe du Maine, le maximum de la température moyenne des eaux de surface est atteint en septembre, et non pas en juin. Un argument de même facture peut expliquer pourquoi l'heure la plus chaude du jour n'est pas midi, heure à laquelle le flux radiatif solaire entrant est proche du maximum, mais quelques heures plus tard. Une analogie familière à certains étudiants est le décalage temporel entre l'accélération maximale d'une voiture, pédale d'accélérateur écrasée, et la vitesse maximale, qui se produit plus tard, lorsque les processus d'accélération et de décélération se compensent. L'accélération (dérivée temporelle de la vitesse) est l'analogue pour le flux de chaleur (qui correspond à la variation temporelle de la température, en dehors des situations de transitions de phase).

REFERENCES

Carlton, K. 2000. "Teaching about heat and temperature". Physics Education 35:101–105.

Garrison, T. S. 2007. Oceanography: An Invitation to Marine Science, 6th ed. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.

Gill, A. E. 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press, 662 pp.

Hewitt, P. G. 2008. Chapters 8 and 9 in Conceptual Physics Fundamentals. Pearson Addison-Wesley.

Lombard, A., A. Cazenave, P. Y. Le Traon, and M. Ishii. 2005. Contribution of thermal expansion to present-day sea level rise revisited. Global and Planetary Change 47:1–16.

Thomaz, M. F., I. M. Malaquias, M. C. Valente, and M. J. Antunes. 1995. An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. Physics Education 30:19–26.

AUTRES RESSOURCES

Sorbjan, Z. 1996. Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments. American Meteorological Society, Washington, DC. Une collection d'expériences construites autour de divers concepts de la météorologie. Le Chapitre 4 traite de la chaleur. Le livre propose aussi des récits historiques, des références à des découvertes majeures, et des anecdotes à propos de divers scientifiques fameux et infâmes.

http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm. Ce site COSEE-OS consacré aux interactions océan-climat propose des images, des vidéos, des nouvelles, et des ressources touchant le stockage de chaleur dans l'océan, la température de surface des mers, les processus de transport de chaleur par convection et advection, réchauffement climatique, et effet de serre.

APPRENTISSAGE EN ÉQUIPE

L'apprentissage en équipe, également appelé apprentissage en coopération, est une approche pédagogique dans laquelle les étudiants travaillent en petits groupes pour acquérir les notions. Cela donne l'opportunité aux étudiants de converser avec leurs pairs, de faire des « brainstormings », de présenter et défendre leurs idées et d'avoir un regard critique sur les structures conceptuelles. Avec cette approche, l'instructeur agit comme un catalyseur et un expert plutôt que comme un « conférencier ». L'apprentissage en équipe peut développer la communication, les résolutions de problèmes, l'esprit critique. De plus, cela augmente l'assurance des étudiants et leur capacité à travailler avec les autres, autant que leur attitude face aux apprentissages (Slavin, 1981). Beaucoup a été écrit sur le sujet dont un livre que nous recommandons, écrit par un océanologue (McManus, 2005). Le site Web de l'université de l'Oklahoma a beaucoup d'informations là-dessus (http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/). Notre but est de mettre en évidence les éléments clés de l'apprentissage en équipe et de montrer comment cette façon de procéder s'accorde bien avec l'approche des enseignements et apprentissages basés sur l'‘investigation que nous prônons.

L'apprentissage en équipe peut être utilisé en classe, au laboratoire ou hors de la classe pour faire les devoirs demandés. Il peut prendre différentes formes (par ex ; Hassard, 2005 ; Joyce and Weil, 2009). Les exemples incluent :

- *Partage par paire* (think-pair-share) : On demande aux étudiants de penser à une question ou un problème individuellement et ensuite de discuter de leurs idées avec leur voisin de table. Chaque paire partage ensuite ses idées avec la classe.
- *Table ronde ou cercle de connaissance* (roundtable ou circle of knowledge) : Un groupe de 3 ou plus étudiants partagent et notent leurs idées. Ensuite, chaque groupe présente le compte rendu à la classe.
- *Puzzle* (jigsaw) : Dans les équipes, chaque étudiant est assigné une tâche de recherche sur un aspect du problème. L'étudiant présente sa recherche aux membres de son équipe. Les étudiants qui avaient la même recherche à faire peuvent former un groupe d'experts pour discuter de leur sujet avant de le présenter à la classe.
- *Controverse constructive* (constructive controversy) : Par équipe ou par paire, les étudiants ont un sujet « opposé » à travailler. Chaque équipe cherche, prépare et présente ses arguments. La classe débat ensuite sur ces sujets après les présentations.

LES ÉLÉMENTS ESSENTIELS

Sans se soucier des différentes stratégies spécifiques utilisées pour l'apprentissage en équipe, quelques éléments essentiels sont requis pour que cette approche soit un succès. Premièrement, l'instructeur doit mettre en avant la responsabilité individuelle et celle du groupe en s'assurant que le temps nécessaire est accordé. Et ce pour atteindre des buts pédagogiques et non juste une conversation du type social. Deuxièmement, l'instructeur doit atteindre une « interdépendance » parmi les étudiants dans les différentes équipes d'apprentissage, et les étudiants doivent savoir que se reposer sur son équipier est inacceptable. Les équipiers doivent savoir que le succès de leur travail dépend des différents apprentissages individuels par chaque membre de l'équipe et ils doivent sentir qu'ils sont tous utiles à l'aboutissement de la tâche. (« ils coulent ou nagent ensemble »). Les deux premiers éléments peuvent être acquis en se partageant le travail, en désignant des rôles, procurant du feedback, et en évaluant les réussites individuelles. Pour éviter que certains se reposent sur d'autres, les membres de l'équipe peuvent être choisis au hasard pour exécuter une tâche et présenter leur groupe durant les discussions.

Un autre élément important est que les étudiants doivent apprendre et développer une capacité de coopération. Ces capacités incluent le fait de pouvoir travailler ensemble (par ex, écoute active, se concentrer sur la tâche, résumer, rendre compte des différentes idées, …) mais aussi de maintenir un esprit d'équipe (par ex en encourageant chacun et procurant du feedback). Et enfin, les étudiants devraient avoir l'occasion de s'auto évaluer en tant qu'équipe. Déterminer l'efficacité du travail du groupe et comment la collaboration est utilisée peut être évalué individuellement, par le groupe ou par toute la classe.

Selon notre expérience, les étudiants qui n'ont jamais travaillé de cette façon, n'aiment pas cette approche car ils ont peur que leurs résultats soient affectés par les autres membres de l'équipe. Nous disons donc aux étudiants que l'évaluation du projet du groupe par les pairs n'est qu'une partie de leur résultat final. L'évaluation par les pairs est faite par chaque membre individuellement et les étudiants sont assurés que leur évaluation ne sera pas partagée avec les autres équipiers. Les étudiants évaluent rapidement l'efficacité du travail d'équipe et de la collaboration en posant des questions telles que :

- Le groupe a-t-il travaillé ensemble ?
- Combien d'équipiers ont participé la plupart du temps ?
- Combien d'équipiers étaient vraiment bien préparés pour cette tâche ?
- Donne un exemple de quelque chose que tu as appris du groupe et que tu n'aurais pas appris tout seul.
- Donne un exemple de quelque chose que les autres membres du groupe ont appris et qu'ils n'auraient pas appris sans le travail d'équipe.

On demande aussi à chaque étudiant de faire une auto évaluation en se posant des questions telles que :

- Etais-tu à l'aise pour travailler avec le groupe ?
- Etais-tu un membre actif et participatif ?
- As-tu bien écouté tes équipiers ?
- Jusqu'à quel degré as-tu aidé tes équipiers à comprendre ?
- As-tu demandé de l'aide de tes équipiers quand tu ne comprenais pas ?

Finalement, on demande à chaque étudiant de donner un % de participation dans le travail d'équipe pour chaque membre sauf pour soi-même et d'expliquer son évaluation (pourcentage). Les informations sur comment évaluer ses pairs peuvent être trouvées sur le site : http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/?page_id=176 .

Les équipes peuvent être choisies par les étudiants eux-mêmes (auto sélection) ou par l'instructeur (au hasard ou choisis). En fonction du choix des équipiers, les groupes peuvent être hétérogènes ou pas du tout égaux face aux notions à voir. Il est retenu comme règle que les groupes doivent rester assez longtemps ensemble pour se sentir efficaces en tant que groupe mais pas trop longtemps ensemble pour ne pas perdre la dynamique et que cela devienne alors contreproductif (par ex quand les équipiers gardent toujours le même rôle). La taille du groupe peut aussi varier. Dans les plus petites équipes, chaque membre participe généralement plus, les qualités sociales sont moins requises et les groupes peuvent travailler plus rapidement. Dans les plus grands groupes, plus d'idées sont brassées et seulement une petite partie du travail est exposée.

Cela ne suffit pas de dire aux étudiants de travailler ensemble. Des encouragements et une bonne dose d'esprit de compétition peuvent accroître la motivation de l'étudiant, ainsi que l'engagement et la contribution de l'équipe. Une structure de récompense peut être basée sur les points (l'équipe avec le plus de points gagne), sur des critères de réussite (l'équipe atteignant un critère prédéterminé (comme par exemple 85% ou plus) reçoit la récompense) ou sur l'amélioration (les étudiants qui contribuent à faire progresser leur équipe par rapport à leurs résultats précédents). Dans ce dernier cas (amélioration), chaque membre qu'il soit moyen, faible ou fort, est mis au défi de faire de son mieux et de contribuer à la réussite de son équipe.

REFERENCES

Angelo, T.A., and K.P. Cross. 1993. Classroom Assessment Techniques:A Handbook for College Teachers, 2nd ed. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 448 pp.

Hassard, J. 2005. The Art of Teaching Science. Oxford University Press, 476 pp.

Joyce, B.R., and M. Weil. 2009. Models of Teaching, 8th ed. Allyn and Bacon, 576 pp.

Michaelsen, L.K., and R.H. Black. 1994. Building learning teams: The key to harnessing the power of small groups in higher education. Pp. 65–81 in Collaborative Learning: A Sourcebook for Higher Education, vol. 2. S. Kadel and J. Keehner, eds, National Center on Postsecondary Teaching, Learning, & Assessment, University Park, PA.

McManus, D.A. 2005. Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups. Anker Publishing Company Inc.,210 pp.

Slavin, R.E. 1981. Synthesis of research on cooperative learning. Educational Leadership 38(8):655–660.

CHAPITRE 5. ONDES DE GRAVITÉ

OBJECTIF

L'objectif de ces activités est de familiariser les étudiants avec le mouvement des ondes en général, et plus particulièrement des ondes de gravité. Des concepts tels que la résonance, la fréquence naturelle et la « seiche » sont démontrés dans ce chapitre. Au cours des discussions, l'accent est également mis sur les mesures et leurs statistiques, ainsi que sur les analyses dimensionnelles.

CONTEXT ET NOTIONS DE BASE

Les ondes (ou vagues) sont omniprésentes dans les océans et les lacs, et plus particulièrement les vagues gravitationnelles de surface qui sont communément visibles le long des plages. Les vagues de gravité jouent un rôle important dans divers phénomènes, y compris la transmission d'énergie du vent à l'océan, l'amélioration de mélange au bris des vagues, l'érosion des plages et l'accumulation de débris flottants sur celles-ci. L'importance de ces vagues dans les loisirs et la culture populaire (surf) ainsi que leur pouvoir destructeur (tsunamis) les rendent familiers du public étudiant, y compris ceux vivant à l'intérieur des terres. Et pourtant, de telles ondes sont rarement utilisées pour enseigner les mouvements harmoniques au collège et dans l'enseignement supérieur.

DESCRIPTION DES ACTIVITÉS

Nous commençons la leçon en demandant aux étudiants de décrire les ondes qui leur sont familières et qui sont en lien avec les océans. La plupart est familiarisée avec les ondes gravitationnelles de surface, tsunamis, son et lumière. Nous utilisons un ressort afin de démontrer la différence entre les ondes longitudinales et transversales (e.g., Hewitt, 2008). Nous discutons les caractéristiques des ondes telles que la longueur d'onde, la fréquence, l'amplitude, la période, la vitesse de propagation (ou phase) et la direction du mouvement dans le milieu. Nous discutons de ce qui est transporté par les ondes (énergie, information) versus ce qui ne l'est pas (composant du milieu; par exemple: un morceau de mousse flotte à la surface et descend sous l'eau quand une vague (onde) passe mais ne se propage pas de manière significative avec cette vague sur une période). Par analogie, nous donnons l'exemple des vagues (ondes) qui sont provoquées au sein des stades par le public lorsque les spectateurs se redressent et lèvent leurs mains successivement. La vague voyage à travers la foule. Il est ainsi facile de percevoir comment des informations sont transférées alors que chaque spectateur reste à sa place. Il est possible de gagner du temps en donnant à la classe des lectures à faire préalablement (e.g., Chapter 13 of Denny, 1993). Celles-ci permettent de familiariser les élèves avec le concept d'onde et d'explorer en classe des concepts supplémentaires tel que les ondes capillaires et les ondes internes. Les activités suivantes sont présentées comme un enchaînement que la classe suit collectivement. Les étudiants sont assis par groupes de trois ou quatre afin de faciliter la discussion.

ACTIVITÉ 5.1. VITESSE D'ONDE ET PROFONDEUR DE L'EAU (Figure 5.1)

Matériel

- Bassin rectangulaire marqué à 1,5cm et 6cm au-dessus du fond (de sciencekit.com)
- Chronomètres
- Récipient avec de l'eau

Procédure et explication

Nous demandons tout d'abord aux étudiants de faire des suggestions quant aux caractéristiques pouvant influencer les vagues (ondes) de petite amplitude (par petite, nous entendons que sa hauteur est inférieure à sa longueur d'onde). Les qualités généralement proposées sont la gravité (g, l'accélération gravitationnelle [force de restauration]; dimension L/T^2) , la longueur d'onde (λ; dimension L), la profondeur (H; dimension L), et la densité (ρ; dimension ML^{-3}). A partir de l'analyse dimensionnelle uniquement (cadre 5.1), il ressort que la vitesse de propagation est proportionnelle à $\sqrt{gH}$ ou $\sqrt{g\lambda}$ fois les fonctions de H/λ. Dit de manière globale, les ondes dont la longueur est inférieure à la profondeur de l'eau à la surface de laquelle elles se déplacent (c'est-à-dire des ondes d'eaux profondes, $\lambda << H$) interagissent avec le fond. Nous nous attendons donc à ce que la profondeur soit un facteur intervenant dans la propagation (ce sont des ondes non-dispersives). Les ondes de grande longueur pénètrent plus profondément (la profondeur de la pénétration de l'onde et la diminution de son amplitude de la surface au fond sont proportionnelles à sa longueur d'onde). L'onde est à l'interface, mais le mouvement associé à la vague se ressent au niveau de la profondeur. Afin de tester si la vitesse de l'onde dépend de la profondeur du fluide, nous réalisons l'activité suivante.

ENCADRÉ 5.1. L'ANALYSE DIMENSIONNELLE

L'analyse dimensionnelle constitue une technique puissante qu'on utilise pour explorer les relations possibles entre un phénomène observé et les variables physiques qui lui sont associées. La plupart des grandeurs physiques peuvent être exprimées en termes d'une combinaison de cinq dimensions fondamentales : la longueur (L), la masse (M) le temps (T), l'intensité électrique (I), et la température (t).

Imaginons par exemple que nous aimerions connaitre les attributs physiques qui déterminent la période d'une balançoire. Les caractéristiques physiques de cette balançoire sont sa masse (m, [M]) et la longueur de la corde (l, [L]). La gravité (associée a l'accélération de la pesanteur g [L/T^2]) constitue la force de rappel. Comment pouvons-nous utiliser l'ensemble de ces variables pour obtenir la dimensionnalité de la dure associée à la période de la balançoire? La seule combinaison fournissant cette dimension est $\sqrt{l/g}$. D'une façon surprenante, au moins pour certains, cette simple analyse suggère que la masse de la balançoire ne joue aucun rôle. On peut facilement vérifier ce résultat par l'expérience. Les analyses dimensionnelles se sont montrées très utiles en général en dynamique des fluides et plus particulièrement en dynamique des fluides géophysiques. En effet, elles permettent une description mathématique simplifiée de problèmes complexes, non linéaires. L'utilisation des nombres sans dimension et la possibilité des modifications des échelles qui y est associée, permet une simplification des équations et facilite l'étude de certains phénomènes.

Chaque groupe d'étudiants reçoit un bassin rectangulaire (L = 30 cm de long). Le bassin est rempli de 1,5cm d'eau. Les étudiants doivent créer une vague en soulevant un côté du bassin avant de le redéposer. On leur compter le compter combien de fois la perturbation va et vient entre les parois pendant un intervalle de 5secondes (il y a environ 6 rebondissements au cours de cette période ; figure 5.1). On demande ensuite aux étudiants de comprendre comment transformer cette information en une mesure de vitesse (longueur du bassin multipliée par le nombre d'aller-retour au sein du bassin par unité de temps = 30 cm x 6/5 s ≈ 0.36 m/s vs la vitesse calculée à partir d'analyse dimensionnelle $\sqrt{gH}$ = 0.38 m/s.) Le degré d'incertitude attendu est de l'ordre de 10 à 20% (étant donné la vitesse de réaction et la précision quant à la localisation de la perturbation à la fin). Le bassin est ensuite rempli jusqu'à une hauteur de 6 cm d'eau. La répétition des mesures de la propagation de l'onde démontre que l'onde rebondit effectivement environ 12 fois en 5 secondes (vitesse ≈ 0.72 m/s vs. la vitesse calculée à partir de l'analyse dimensionnelle $\sqrt{gH}$ = 0.76 m/s). Notons qu'aucune dépendance n'est observée au niveau de l'amplitude de l'onde initiale (variable inter-groupe). L'onde dans le bassin a une longueur de 60 cm ($\lambda >> H$). Nous discutons le fait que si la prédiction théorique est correcte (dépendance de $\sqrt{H}$), quadrupler la profondeur devrait doubler la vitesse de l'onde et accroître la distance parcourue en 5 secondes (cfr. observations). Si plusieurs groupes participent ou si des reproductions sont réalisées, des descripteurs statistiques des résultats, tels que la vitesse moyenne ou médiane et les mesures de variance et d'incertitude peuvent être calculés.



Figure 5.1. Vitesse d'onde et profondeur. Les étudiants mesurent le nombre d'allers-retours dans un bassin dans lequel la profondeur de l'eau et de 1,5 cm.

A ce stade, nous demandons aux étudiants si un tsunami est une vague (onde) d'eau de grande ou de faible profondeur. Etant donné que la mesure latérale d'un tsunami est déterminée par la longueur de la zone de rupture pendant le tremblement de terre (~ 100,000 m) et que la profondeur maximale de l'océan est significativement plus petite (~ 11,000 m), on le qualifie de vague d'eau peu profonde. Dans ce cas, pourquoi une telle onde est-elle tellement destructrice ? Etant donné que la vitesse dépend de la profondeur (~), les ondes gravitationnelles de surface ralentissent lorsque la bathymétrie diminue et que la longueur d'onde raccourcit. Ainsi, le "front" de l'onde d'eau peu profonde se propage plus lentement que sa "queue" lorsque la profondeur de l'eau diminue. La diminution du fond sous la vague accroit sa hauteur (tandis que creux et sommet se rapprochent) si bien qu'éventuellement la vague se brise. Dans un océan ouvert, un tsunami peut avoir une vitesse de plusieurs centaines de km/h et une hauteur d'à peine quelques centimètres, mais lorsque la vague s'approche du rivage, sa vitesse diminue et sa hauteur augmente significativement pouvant atteindre plusieurs mètres.

Le ralentissement de vagues dans de l'eau de faible profondeur peut également causer une vague de réfraction lorsque la vague atteint la plage selon un certain angle. L'onde de réfraction, bien connue de la loi de Snell, fait référence au changement de direction du "front" d'une onde à cause d'une modification de la vitesse de propagation. Lorsqu'une onde approche le rivage et "sent" le fond de mer, le "train de l'onde" dans l'eau de faible profondeur ralentit comparativement à la partie en eau profonde, ce qui provoque un alignement plus rapproché avec des contours bathymétriques. De nombreuses bonnes images d'ondes de réfraction peuvent être trouvées sur le Net en utilisant les recherches sur Google Image.

ACTIVITÉ 5.2. ONDES INTERNES (Figure 5.2)

Matériel

- Cuve rectangulaire avec séparation (de sciencekit.com)
- Chronomètre
- Deux récipients : un avec de l'eau fraîche et l'autre avec de l'eau sucrée ou salée teintée (approximativement 75g de sel dilué dans 1L d'eau du robinet)

Procédure et explication

La même cuve rectangulaire est utilisée pour démontrer et discuter à propos des vagues internes qui se forment à l'interface entre des fluides de densités différentes (par exemple les couches stratifiées dans les océans; voir activité 1.4). La cuve peut être divisée en deux compartiments en introduisant une cloison en plastique. On demande aux étudiants de remplir une cuve avec de l'eau fraîche et l'autre avec de l'eau salée (ou sucrée) colorée. On leur demande quelles sont leurs prédictions quant à ce qui va se produire lorsque la cloison sera retirée (voir également activité 1.4). La cloison est alors retirée, et le fluide le plus dense coule sous le fluide moins dense. Une fois que le fluide de chacun des compartiments atteint l'extrémité opposée de la cuve, une onde interne se propage faisant des allers-retours le long de l'interface entre les fluides de différentes couleurs (figure 5.2.). On demande aux étudiants de mesurer la vitesse de l'onde qui est significativement inférieure à celle des deux ondes gravitationnelles de surface étudiées précédemment. Au sein de l'océan, le bris des ondes internes se trouve à l'origine du mélange de la chaleur et de sel nutritifs à la base de la couche mélangée et au voisinage des zones à topographie escarpée (par exemple, Kunze and Llewellyn Smith, 2003). Les ondes internes peuvent également faire remonter des eaux de l'obscurité vers une position ensoleillée, plus proche de la surface, où les populations de phytoplancton peuvent trouver suffisamment de lumière pour grandir. Pour la même énergie d'excitation et longueur d'onde, l'amplitude des ondes gravitationnelles internes est significativement plus grande que celle des ondes gravitationnelles de surface. Ceci s'explique par le fait que la force gravitationnelle de restauration (et l'énergie potentielle associée à cette onde) pour une hauteur d'onde donnée est plus petite pour des ondes internes, étant donné la faible différence de densité entre les couches d'eau comparée

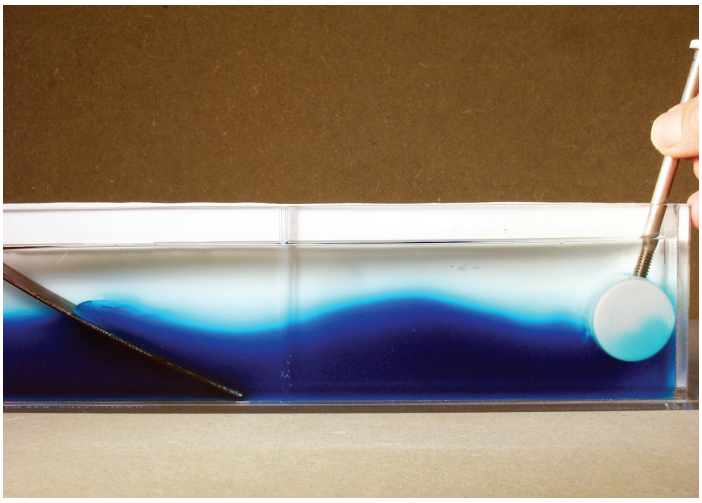

Figure 5.2. Ondes internes. Une onde interne à l'interface entre des fluides de densités différentes (bleu-dense, claire-moins dense). Une pagaie utilisée pour démontrer le phénomène de résonance (voir texte) est au côté droit du bassin, tandis qu'un morceau de plastique simule une topographie de profondeur diminuée du côté gauche du bassin.

à celle entre l'eau et l'air pour les ondes gravitationnelles de surface. (un autre exemple d'onde interne est décrit dans Franks and Franks, 2009.)

A ce stade, nous introduisons les concepts de "seiche" et de résonance. Lorsque nous perturbons le système des deux couches en retirant la cloison de la cuve, de nombreuses ondes étaient excitées. Cependant, seules celles dont la taille correspond à la géométrie du bassin sont conservées. Il ne reste pour finir qu'une seule vague qui se propage en faisant des allers-retours dans le bassin selon un rythme spécifique. Comparativement aux instruments de musique dont la tonalité de base dépend de la taille de leurs cordes et de leur caisse de résonance, la géométrie d'un bassin (comme par exemple le bassin expérimental, un lac ou une baie) détermine quelles ondes sont excitées lorsqu'une force est appliquée puis relâchée. (par exemple, celle provoquée par le passage d'une tempête). Ces ondes sont le mode "naturel" du bassin et sont appelées "seiche"; leur fréquence est décrite comme une fréquence "naturelle". Agiter un bassin à sa fréquence naturelle excite ces ondes-là. Ce phénomène est appelé "résonance". Afin de démontrer la résonance, nous utilisons une pagaie à ondes (un grand morceau de plastique de 2cm de haut avec une largeur similaire à celle du bassin ; Figure 5.2). Nous abaissons et remontons la pagaie dans le bassin stratifié selon une période correspondant à celle de l'onde excitée précédemment. Autrement dit, lorsque nous appliquons une force de courte période (c'est-à-dire, abaisser et relever la pagaie à une fréquence d'environ une seconde), des ondes gravitationnelles de surface se forment (attention aux débordements). Lors qu'une plus longue période est appliquée (c'est-à-dire abaisser et relever la pagaie avec une fréquence d'environ 10 secondes), des ondes internes se forment. L'introduction oblique d'un morceau de plastique à un angle au bout du bassin permet de simuler une topographie de profondeur qui diminue le long et d'observer le brisement des ondes internes (Figure 5.2.)

ACTIVITÉ 5.3. OSCILLATIONS DE FLOTTABILITÉ (Figure 5.3)

Matériel

- Un cylindre gradué avec un fluide stratifié (de l'eau salée en bas et de l'eau fraîche au dessus)
- Une balle de ping-pong avec de l'argile attachée en guise de lest (ou une éprouvette lestée de rondelles (poids)) de façon à ce que la balle (ou l'éprouvette) reste à l'interface entre les deux fluides.

Procédure et explication

Les oscillations de flottabilité sont les ondes internes avec la fréquence la plus élevée qu'on puisse trouver dans les océans. Elles peuvent être facilement démontrées par un cylindre gradué et un flotteur calibré (Figure 5.3, panneau gauche) ou une balle de ping-pong lestée avec de l'argile (Figure 5.3, panneau droit). De l'eau salée et de forte densité est versée dans le cylindre suivi d'eau fraîche. Le flotteur est introduit à l'interface entre les deux couches et est perturbé en le poussant vers le bas à l'aide d'une fine tige. La fréquence d'oscillation (appelé la fréquence de flottabilité ou fréquence Brunt-Vaissalla) est une fonction du contraste entre la densité des deux couches. La fréquence est proportionnelle à la racine carrée du gradient de densité, tel qu'on pouvait s'y attendre à partir d'une analyse dimensionnelle. Les étudiants peuvent tester cette dépendance en chronométrant les oscillations dans les cylindres gradués contenant différents gradients de densité. Pour les étudiants avancés, la description mathématique de ce problème peut être introduite. Les mathématiques sont relativement simples (culminant dans une équation d'onde unidimensionnelle) et enrichissantes.

Les ondes d'un fluide sont un sujet vaste et fascinant (voir, pour exemple, les livres de Lebond et Mysak, 1978, et Lighthill, 1978). Les fluides soutiennent une large variété d'ondes, étendant les sujets de physique de la tension superficielle au son, à la lumière, aux ondes de gravité, ainsi qu'aux ondes verticales planétaires (ondes à large échelle avec une vitesse angulaire significative sous l'influence de la rotation de la terre). Etant donné que les ondes sont les transporteurs d'informations au sein des fluides, chaque force quelle qu'elle soit (p.e. un changement dans

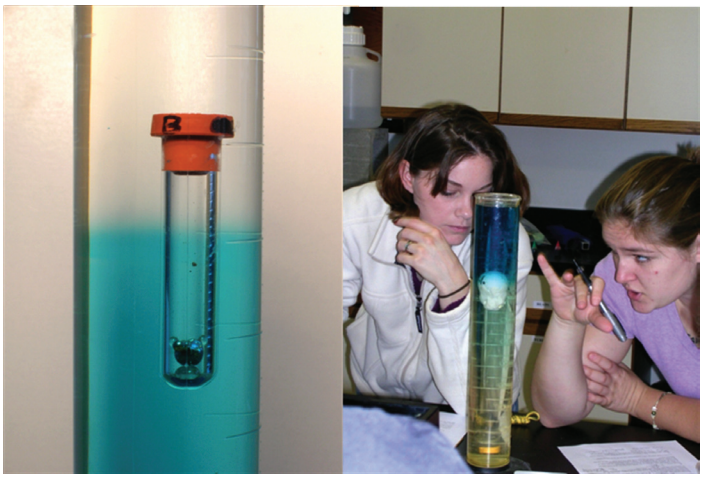

Figure 5.3. Oscillations de Flottabilité . Un flotteur de densités intermédiaire entre deux couche de densité différente (l'une plus dense et l'autre moins dense que le flotteur). Pousser vers le bas le flotteur oscillant avec une fréquence qui dépend de la différence de densité entre les deux couches.

le type de vent au-dessus de l'océan) entraîne l'excitation d'une onde. Un exemple est la transition La Niña/El Niño, lorsque les alizés sont significativement affaiblis au-dessus de la région équatoriale du Pacifique. Cet échange excite les Ondes Kelvin qui se propagent d'Ouest en Est le long de l'équateur, tel qu'on peut l'observer sur des images télédétectées de la hauteur de la surface de l'océan (par exemple .http:// oceanmotion.org/html/impact/el-nino.htm). Les impacts sur la biologie de l'océan peuvent également être observés sur base d'images couleurs télédétectées (par exemple, http://svs.gsfc.nasa.gov/stories/elnino/index.html).

REFERENCES

Denny, M.W. 1993. *Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.

Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implicationsof ocean layering. *Oceanography* 22(1):228–233. Available online at: http://tos.org/hands-on/index.html (accessed August 4, 2009).

Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, Orlando, FL, 662 pp.

Hewitt, P.G. 2008. Chapter 12 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.

Kunze, E., and S.G. Llewellyn Smith. 2003. The role of small-scale topography in turbulent mixing of the global ocean. *Oceanography* 17(1):55–64. Available online http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/17_1.html (accessed August 13, 2009).

LeBlond, P.H., and L.A. Mysak. 1978. *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series, 20. Elsevier, Amsterdam, 602 pp.

Lighthill, J. 1978. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 504 pp.

AUTRES RESSOURCES

Duxbury, A.C., A.B. Duxbury, and K.A. Sverdrup, 2000. Chapter 9 in *An Introduction to the World's Oceans*, McGraw-Hill.

Garrison, T., 2009. Chapter 9 in *Essentials of Oceanography*, 5th ed., Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.

Pinet, R. 2000. Chapter 7 in *Invitation to Oceanography*. Jones and Bartlett Publishers Inc., Sudbury, MA.

Pond, S., and G.L. Pickard, 1983. Chapter 12 in *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press.

Thurman, H.V. 1997. Chapter 9 in *Introductory Oceanography*. Prentice Hall. *Waves, Tides and Shallow-water Processes*. The Open University, Pergamon Press.

Films d'ondes internes dans un fluid avec stratification continue: http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/iw/index.htm

Films sur le déferlement par le gradient de courant d'ondes internes (L'instabilitée Kelvin-Helmholz): http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/kh/1/res.htm

REMERCIEMENTS

Notre approche de l'enseignement des sciences est le fruit d'une collaboration entre scientifiques, didacticiens et enseignants des sciences avec lesquels nous travaillons depuis des années. Comme pour toute collaboration interdisciplinaire, beaucoup de temps et de volonté ont été nécessaires pour établir un effort d'enseignement collaboratif. Il nous fut nécessaire de nous ouvrir à des cultures professionnelles inhabituelles et à des termes inhabituels. L'immense bénéfice tant pour nos étudiants que pour nous valait l'effort. Nous remercions le programme « the National Science Fondation COSEE » d'avoir facilité et soutenu cette collaboration et d'avoir financé ce supplément du magazine *Oceanography*. Nous remercions également tous les étudiants et enseignants qui ont pris part au développement de ces activités et ont fourni un retour très précieux. Nous remercions Annette deCharon pour son soutien et ses encouragements ainsi que John Thompson pour les discussions pleines d'inspirations. Nous sommes reconnaissants à Sharon Franks, Robert Feller, and Tonya Clayton pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer considérablement le manuscrit. La traduction française a bénéficié de l'aide de: Jean Marie Beckers, Emmanuel Beeckmans, Jean-François Boss, Patricia Corieri, Fabrizio D'Ortenzio, Christine Delépine, Régine Dupuis, Marie-Françoise Lefèvre, Philippe Léonard, Marie le Polain, Serge Pahaut, Sylvie Pourbaix, Christine Sarrette et Guy Talin. Finalement, la publication de ce document n'aurait pas été possible sans la contribution et l'enthousiasme d'Ellen Kappel. Nous la remercions ainsi que Vicky Cullen pour le travail d'édition dévoué et de qualité ainsi que Johanna Adams pour la mise en page et la conception.

—Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller, James Loftin, et Jennifer Albright



WWW.TOS.ORG/HANDS-ON

CoSEE
CENTERS FOR OCEAN SCIENCES EDUCATION EXCELLENCE

THE OCEANOGRAPHY SOCIETY

FRENCH VERSION | AUGUST 2010