Salinité, masse volumique et circulation océanique

Une expérience attrayante pour démontrer en classe l'effet de la salinité et de la masse volumique sur la circulation océanique

Daniel Bourgault et Dany Dumont, *Institut des sciences de la mer de Rimouski*

9 septembre 2014

1 Introduction

On peut lire, dans la Progression des apprentissages de l'univers Terre et espace du Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport du Québec [1], que les élèves doivent acquérir certaines connaissances scientifiques en lien avec les océans. Ils doivent être en mesure, à la fin de leur secondaire IV, de :

1. Définir la salinité comme étant une mesure de la quantité de sels dissous dans un volume donné ;
2. Décrire l'influence de la salinité sur la masse volumique d'une solution ;
3. Décrire des facteurs qui influencent la circulation des courants en surface et en profondeur (ex. : vents, rotation terrestre, température, salinité, masse volumique) ;
4. Décrire le rôle de la circulation thermohaline sur la régulation du climat planétaire (ex. : effet du Gulf Stream sur le climat de la côte est de l'Amérique du Nord).

Après une brève révision des concepts de salinité, de masse volumique et de force de flotabilité, cette fiche propose une démonstration attrayante pour illustrer en classe de façon très concrète comment les différences de salinité peuvent induire des mouvements d'eau, et donc une circulation océanique en extrapolant le concept à grande échelle, par le biais des forces de flottabilité. Une vidéo illustrant toutes les étapes de la démonstration principale, ainsi que quelques variantes, accompagne cette fiche.

Notez que cette fiche ne traite que des concepts interelliés de salinité, de masse volumique et de force de flotabilité. Les autres forces importantes pour la circulation océanique qui doivent aussi être enseigné, telles que le vent, les marées ou la force due à la rotation terrestre, ne sont pas discutées ici.

2 Les forces de flottabilité

La gravité est une force fondamentale qui agit sur tous les corps et les fluides possédant une masse. La gravité fait en sorte que les fluides plus lourds (de masse volumique plus élevée) tendent à se retrouver en-dessous des fluides plus légers (de masse volumique plus faible). C'est généralement le cas dans les océans où les eaux denses se retrouvent plus en profondeur, en-dessous des eaux de surface plus légères. Cette structure verticale est appelée la *stratification* de l'océan.

Lorsque des eaux de masses volumiques différentes se retrouvent côte à côte ou lorsque de l'eau plus dense se retrouve par-dessus de l'eau légère (deux situations que l'on rencontre dans les océans), un mouvement se

1. Voir : http://www1.mels.gouv.qc.ca/progressionSecondaire/domaine_mathematique/science/index.asp?page=terreEspace

crée afin de rétablir la situation d'équilibre dans laquelle l'eau légère est au-dessus par dessus de l'eau dense. La circulation ainsi engendrée est causée par la force dite de *flottabilité*.

Revisitons d'abord les concepts de salinité et de masse volumique avant de poursuivre avec la description de l'expérience pour illustrer cette force.

2.1 Salinité

En océanographie, la salinité est définie comme étant la masse de sel, exprimée en g, contenu dans 1 kg d'eau de mer. La salinité moyenne des océans est de $S = 35$ g/kg. Comme il y a un facteur 1000 de différence entre g et kg, il est parfois plus facile d'exprimer cette quantité en *pour mille* (‰). Il est donc acceptable d'indiquer que la salinité moyenne des océans est de $S = 35‰$. Certains manuels scolaires présentent la salinité en pourcentage (ex : 3.5%), mais cela est inhabituel en océanographie. En fait, la salinité telle que définie est une quantité sans dimension (c'est-à-dire sans unité puisqu'il s'agit d'un rapport de masse) de sorte qu'il est maintenant recommandé d'exprimer la salinité sans y ajouter aucun autre symbole et simplement comme $S = 35$.

Notez que certains manuels scolaires définissent la salinité comme étant la quantité de sel dissous par litre d'eau de mer (exprimé en g/L). Cette définition est très proche de la définition ci-haut mais en diffère un peu puisqu'un litre d'eau de mer n'est pas précisément égal à un kilogramme d'eau de mer. Pour l'enseignement au niveau secondaire, il est acceptable de présenter la salinité ainsi, mais il est important de noter qu'il ne s'agit pas de la définition communément acceptée par les océanographes.

2.2 Masse volumique

La masse volumique de l'eau de mer est principalement déterminée par sa température et sa salinité (pour simplifier on fait abstraction ici de l'effet de la pression qui joue un rôle important surtout aux grandes profondeurs). Plus l'eau est salée, plus elle est dense. Aussi, plus l'eau de mer est froide, plus elle est dense. Cependant, cela n'est strictement vrai que si la salinité est plus grande que $S \geq 25$, ce qui est le cas dans la très grande majorité des milieux océaniques. Ce n'est pas le cas dans certains milieux côtiers d'eau saumâtre comme certains estuaires et fjords alimentés par de grands volumes d'eau douce d'une ou plusieurs rivières. Pour de l'eau douce ($S = 0$), la masse volumique atteint un maximum autour de 4°C et diminue jusqu'au point de congélation (0°C). À mesure que la salinité augmente, de $S = 0$ vers $S = 25$, le maximum de masse volumique s'atteint à des températures se rapprochant de plus en plus du point de congélation. C'est autour de $S = 25$ que les points de congélation et de maximum de masse volumique se rencontrent.

La masse volumique de l'eau de mer peut se calculer à l'aide d'une formule assez complexe appelée l'équation d'état de l'eau de mer et qui est fonction de la température, de la salinité et de la pression [2]. On peut cependant utiliser une version considérablement simplifiée de cette formule. À température ambiante (autour de 20°C) et à pression atmosphérique normale, on peut obtenir une très bonne approximation de la masse volumique de l'eau de mer ρ en fonction de la salinité S à partir de la formule suivante :

$$\rho = \rho_r \left(1 + \beta(S - S_r)\right), \qquad (1)$$

où $\rho_r = 1024.76$ kg/m^3 et $S_r = 35.00$ sont, respectivement, une masse volumique et une salinité de référence, et $\beta = 0.000744$ est une constante (appelée coefficient d'expansion). Par exemple, pour une eau de salinité de $S = 30$, cette formule indique que la masse volumique est de $\rho = 1020.95$ kg/m^3. Cette formule est exacte à température ambiante (20 °C) et pour $S = 35$. La marge d'erreur augmente à mesure que l'on s'éloigne de ces valeurs de référence. Par exemple, l'erreur est de -0.9 kg/m^3 pour $S = 70$ et $T = 18$ °C et de $+0.3$ kg/m^3 pour $S = 0$ et $T = 22$ °C. Cette formule peut être utile pour la démonstration présentée ci-dessous et, surtout, pour l'idée plus avancée du projet d'Expo-science exposée ci-bas.

3 Démonstration

Comme discuté à la section précédente, une force de flottabilité, et donc une accélération (on se souvient de $F = ma$), est engendrée lorsque deux volumes d'eau de masses volumiques différentes se retrouvent côte-à-côte : l'eau moins dense aura tendance à flotter et à

2. On peut trouver cette équation en ligne sur plusieurs sites (ex : http://lecalve.univ-tln.fr/oceano/ies80/index.html) qui permettent aussi de calculer directement la masse volumique pour des valeurs données de température, de salinité et de pression.

s'étaler par-dessus l'eau plus dense, et vice-versa. Cela créera des mouvements importants qui ne sont pas tous intuitifs, ce que nous proposons d'observer avec la démonstration suivante.

L'expérience consiste à mettre dans un réservoir deux volumes d'eaux de masses volumiques différentes côte-à-côte. Les deux fluides sont initialement séparés par une division amovible. On utilise du sel pour augmenter la masse volumique de l'eau. En enlevant la division centrale, un courant sera généré par la force de flottabilité. Plusieurs autres phénomènes de turbulence et d'oscillations internes seront aussi créés. La démonstration est très visuelle et illustre très bien l'effet de la salinité sur la masse volumique ainsi que l'effet des différences de masses volumiques entre des eaux adjacentes (c'est-à-dire la force de flottabilité) sur la circulation océanique.

Voici le matériel nécessaire (Figure 1) :

- 1 réservoir de Plexiglass. Le réservoir utilisé ici a une dimension intérieure de 1.00 m de long × 0.10 m de large × 0.15 m de haut mais d'autres dimensions peuvent très bien être utilisées ;
- 1 division centrale amovible pour séparer le réservoir en deux. Cette division centrale n'a pas besoin d'être parfaitement étanche mais elle doit tout de même s'insérer assez justement pour minimiser les échanges d'eau entre les deux sections ;
- 2 seaux de 15 L, gradués ;
- 500 g de sel de table, idéalement du gros sel à marinade qui produit une solution plus claire, moins laiteuse, car il n'y a pas d'additif ;
- 1 agitateur manuel ;
- 1 paquet de colorant alimentaire ;
- 1 compte-goutte ;
- Du papier absorbant ;
- Un bout de tuyau d'environ 1 m de long pour vider le réservoir.

Figure 1: *Le matériel de base pour la démonstration.*

1. La première étape consiste à préparer une solution d'eau salée et bleue. Dissoudre 500 g dans 10 L d'eau dans un des seaux et ajouter généreusement du colorant alimentaire bleu. Cette solution donnera une salinité très proche de $S = 48$ (47.6 plus exactement), c'est-à-dire considérablement plus élevée que l'eau de mer typique. Pour le besoin de la démonstration il n'est pas nécessaire de respecter les réelles conditions océaniques. La démonstration fonctionne bien avec cette salinité, mais peut aussi bien se faire avec d'autres salinités plus ou moins élevées. Comme nous le verrons plus bas (équation 2), plus la différence de salinité est grande (et donc de masse volumique), plus la force de flottabilité est grande et plus les mouvements générés dans le réservoir seront rapides. Cet aspect peut être exploré en classe si le temps le permet.

   En utilisant la formule 1, cette salinité donne une masse volumique de $\rho_s = 1034.37$ kg/m^3 (l'indice s est utilisé ici pour indiquer l'eau salée). Si un densimètre est disponible, il peut être intéressant de l'utiliser pour mesurer la masse volumique de cette solution saline et de comparer la valeur mesurée avec celle-ci qui a été obtenue par la formule 1.
2. Dans le deuxième seau verser simplement 10 L d'eau douce du robinet et colorer généreusement de jaune. À température de la pièce (20°C), cette eau aura une masse volumique très proche de $\rho_d = 1000$ kg/m^3 (l'indice d est utilisé ici pour indiquer l'eau douce).
3. Insérer le séparateur au centre du bassin.
4. Il faut ensuite remplir **simultanément** les deux sections du réservoir avec l'eau salée (bleu) d'un côté et l'eau douce (jaune) de l'autre. Pour cette étape, vous aurez besoin de l'aide de trois élèves. Deux personnes devront simultanément transvider assez délicatement les deux types d'eau de chaque côté du réservoir, une personne devra tenir le séparateur central s'il n'est pas très ajusté et une personne agira comme guide pour veiller à ce que l'eau de chaque côté soit transvidée à vitesse égale. Cela évitera qu'une trop grande différence de pression [3] se fasse de part et d'autre du diviseur central ce

3. La pression dont on parle ici est celle exercée par le poids

qui ferait que de l'eau bleue se retrouverait dans la jaune, ou vice-versa, si le séparateur n'est pas parfaitement étanche. Verser pour avoir environ 10 cm de hauteur d'eau totale. Ici encore, cette hauteur n'est qu'une suggestion. Nous verrons plus bas avec l'équation 2 que plus la hauteur du fluide est haute, plus les courants engendrés seront rapides.

5. Attendre environ une minute pour que l'eau de chaque côté se stabilise un peu.
6. Demander aux élèves de se pencher pour bien observer ce qui se passera et enlever délicatement, mais assez rapidement, la division centrale.

La Figure 2 illustre la séquence de la démonstration. Comme attendu, un courant de densité est ainsi créé avec l'eau salée et dense (bleu) qui ira s'insérer en dessous de l'eau douce (jaune). Pendant ce processus, vous observerez de la turbulence qui va partiellement mélanger les deux fluides. L'eau ainsi mélangée apparaît comme une couche verte en sandwich entre les eaux salée et douce. Ce qui se passe est tout-à-fait comparable aux mouvements que l'on observe dans les océans, les estuaires ou les fjords.

Remarquez que les fronts qui se propagent iront éventuellement frapper les extrémités du réservoir. Cela causera une sorte de rebondissement, c'est-à-dire une réflexion, et il y aura par la suite de grandes oscillations internes, aussi appelées *ondes internes*, qui persisteront pendant un bon moment (quelques minutes). L'intérieur de l'océan est rempli de ces ondes internes mais elles y sont plus difficilement observables. Les océanographes arrivent tout de même à les déceler à l'aide de certains appareils acoustiques et autres mesures de la température et de la salinité. Ces ondes internes sont analogues aux vagues de surface, mais plutôt que de se propager à l'interface entre l'océan et l'atmosphère elles se propagent entre deux couches de masses volumiques différentes qui se trouvent à l'intérieur même de l'océan. Plus généralement, on peut dire que des vagues peuvent se propager là où il y a une différence de masse volumiques entre deux fluides que ce soit entre l'eau et l'air, l'eau et l'huile, l'eau salée et douce ou l'eau chaude et froide.

Cette démonstration montre aussi comment l'océan est *stratifié* verticalement, c'est-à-dire organisé en couches de masse volumiques différentes. L'expérience montre que malgré la présence de forts mouvements et de turbulence, il est difficile de complètement mélanger deux masses d'eau de masses volumiques différentes. Il faut beaucoup d'énergie pour cela, et ceci implique une des caractéristiques fondamentales de l'océan : l'océan n'est pas homogène. Même les vents et les marées n'arrivent pas à homogénéiser l'océan.

du volume d'eau. Si le niveau d'eau d'un côté est plus grand que celui de l'autre côté, l'eau s'écoulera vers l'endroit où la pression (le niveau) est le plus bas, comme le fait l'eau d'une rivière. Il est intéressant de noter que c'est la gravité qui cause la pression dans le fluide qu'on appelle *pression hydrostatique*.

3.1 Quelques variantes

La vidéo qui accompagne ce document montre quelques variantes qui peuvent se faire avec cette expérience. Après avoir réalisé la première démonstration, il est intéressant, par exemple, d'insérer à nouveau la division à une dizaine de cm de l'une des extrémités, de bien mélanger ce volume et de le colorer d'une autre couleur. Demandez aux élèves ce qui se passera en enlevant la division. Cela crée une eau ayant une masse volumique intermédiaire aux deux autres eaux. En enlevant la barrière, cette eau ira s'insérer entre les deux autres. D'autres ondes internes seront aussi générées. Les océanographes appellent ce phénomène *intrusion*, et on l'observe aussi dans les océans.

On peut aussi illustrer la circulation dite thermohaline qui doit aussi être enseigné dans le programme de secondaire IV (voir la Progression des apprentissages présentée en Introduction de cette fiche). Vous pouvez remplir le réservoir avec de l'eau chaude du robinet et insérer à chaque extrémité des *ice-packs*. Cette configuration est une façon simplifiée de représenter ce qui se passe lorsque l'eau est refroidie aux hautes latitudes (nord et sud). L'eau chaude en contact avec les ice-packs se refroidira et deviendra plus dense. Cette eau ainsi refroidie aux deux extrémités s'écoulera en profondeur vers le centre du bassin. Une partie de l'eau surgira à la surface et ainsi tout le bassin sera mis en mouvement, un peu comme la grande circulation thermohaline. Pour voir cette circulation il s'agit simplement d'ajouter un peu de colorant aux deux extrémités avec le compte-goutte (voir la vidéo pour ces exemples).

3.2 Pousser plus loin : idée pour un projet Expo-Science

Ce type d'expérience peut être poussé beaucoup plus loin et il y a plusieurs variantes possibles. On peut

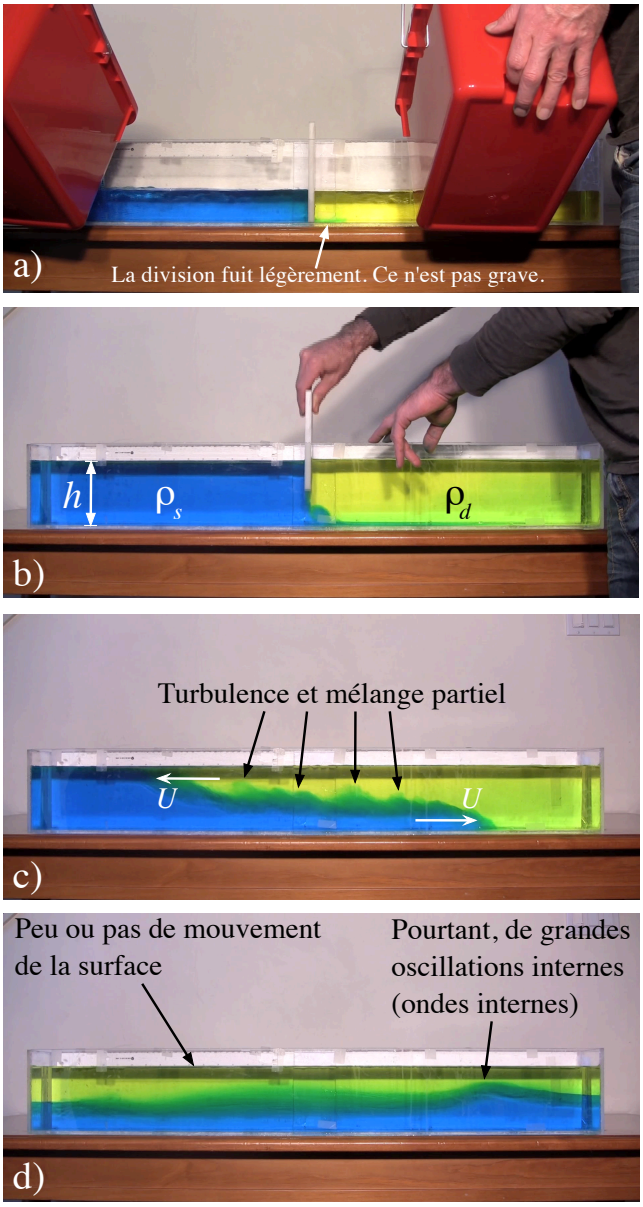

Figure 2: *Séquence de la démonstration. L'eau bleue, salée, est caractérisée par une masse volumique ρ_s plus grande que l'eau douce jaune ρ_d. En enlevant la division un courant est créé. Il y aura nécessairement de la turbulence à l'interface qui produira une eau mélangée de couleur verte. La théorie (équation 2) indique la vitesse d'avancement des fronts U connaissant les masses volumiques des deux eaux adjacentes (ρ_s et ρ_d) et l'épaisseur totale h du fluide.*

même en faire un projet d'Expo-Science pour les élèves intéressés.

Un aspect fondamental de la science en général, et de l'océanographie en particulier, est de développer des théories et de les comparer aux mesures. Sans donner ici la démonstration mathématique, il existe une théorie qui prédit la vitesse de propagation du front initial connaissant la hauteur de l'eau h et les différences de masse volumique des deux eaux adjacentes. Cette théorie nous dit que la vitesse de propagation du front, notée U (en m/s), est donnée par la formule suivante :

$$U = \frac{1}{2}\sqrt{g\left(\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}\right)h}, \qquad (2)$$

où $g = 9.8$ m/s^2 est l'accélération gravitationnelle, ρ_d et ρ_s (en kg/m^3) sont, respectivement, les masses volumiques de l'eau douce et salée, et h (en m) est la hauteur d'eau totale (voir la Figure 2 pour les variables en jeu). Notez que cette théorie est valide si chaque volume d'eau est identique, c'est-à-dire que le diviseur est initialement placé au centre. Si les volumes d'eau ne sont pas identiques, il faut utiliser une formule légèrement différente de celle-ci. Nous ne présentons pas cette autre formule ici.

Par exemple, si on prend les caractéristiques des eaux telles que proposées dans la démonstration précédente ($\rho_d = 1000$ kg/m^3, $\rho_s = 1034.37$ kg/m^3) avec une hauteur de $h = 0.1$ m, cela donnera une vitesse théorique de $U = 0.09$ m/s. Cette vitesse théorique peut donc être comparée à une mesure tirée de l'expérience. Cela devra se faire en installant une règle sur le réservoir et en faisant une capture vidéo. Une analyse simple de la vidéo permettra de déterminer la distance parcourue par le front en un certain temps et ainsi obtenir une mesure de la vitesse.

Plusieurs expériences peuvent être répétées avec des salinités différentes, et donc des masses volumiques différentes, et des hauteurs d'eau différentes. Des comparaisons statistiques pourront se faire entre les valeurs théoriques de la vitesse de propagation et les mesures expérimentales. Une discussion pourrait se faire pour expliquer jusqu'à quel point la théorie colle ou non aux mesures tout en tenant compte des incertitudes sur les mesures et des limitations de la théorie.

Remerciements

Ce document a été préparé dans le cadre de la *La journée des enseignants* qui a eu lieu à Rimouski le 6 juin 2014 et qui a été organisée par la Société canadienne de météorologie et d'océanographie et par Québec-Océan. Nous tenons à remercier Emmanuelle Tessier,

enseignante à l'école Paul-Hubert de Rimouski, Rachel Picard, coordonnatrice de Québec-Océan, Émilie Morin, professionnelle de recherche en didactique des sciences, ainsi que Louis Gostiaux, chercheur au Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (Lyon, France), pour leurs commentaires à propos de ce document.