

Mots-clefs « eau potable » et « surveillance et lutte contre les pollutions ».

1 Étude documentaire : Dessaler l'eau de mer (45 min)

Pour pallier le manque d'eau douce (et donc d'eau potable), de plus en plus d'usines de dessalement de l'eau de mer sont construites dans le monde.

1.1 Les compétences

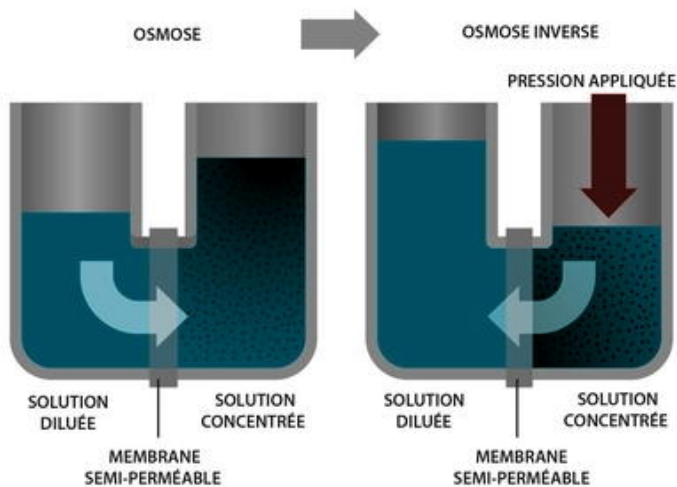
- Faire preuve de curiosité.
- Identifier les paramètres jouant un rôle dans un phénomène physique.

1.2 Situation problème

Le dessalement coûte cher (même si les prix ont diminué au cours des années) et il n'est pas sans effet sur l'environnement, car il engendre des gaz à effet de serre et des eaux de rejet fortement salées.

Il existe deux grands types de procédés pour dessaler l'eau de mer. Le premier, thermique, repose sur la distillation. Il consiste à chauffer l'eau de mer pour produire une vapeur d'eau pure, que l'on condense ensuite sur des faisceaux de tubes refroidis afin d'obtenir de l'eau douce.

Le second procédé, plus récent, est basé sur l'osmose inverse (figure ci-dessous). Si deux solutions aqueuses de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable (elle laisse passer l'eau, mais pas les solides dissous), l'eau de la solution la moins concentrée migre vers la solution la plus concentrée de façon à égaliser les deux concentrations : c'est l'osmose.



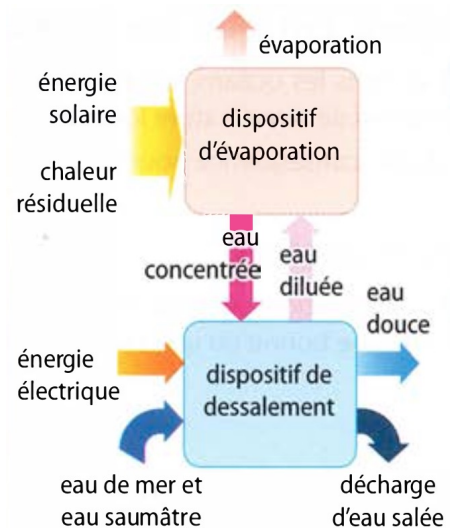
Dans l'osmose inverse, on empêche le transfert d'eau de se réaliser normalement en exerçant une pression sur la solution la plus concentrée. Ainsi l'eau passe vers la solution la moins concentrée, tandis que les espèces dissoutes restent dans le compartiment.

Quelle que soit la technique utilisée, le dessalement a un coût énergétique assez élevé : pour produire un mètre cube d'eau douce, il faut au moins 10 kWh pour les meilleurs procédés thermiques et 4 à 5 kWh pour les installations d'osmose inverse les plus modernes.

1.3 Analyse du problème

Deux ingénieurs de Vancouver (Canada), Ben Sparrow et Joshua Zoshi, ont mis au point un autre système de dessalement, avec une consommation énergétique moindre (environ 1 kWh par mètre cube d'eau douce produit).

Cette technique repose sur les échanges ioniques à travers des jonctions en polystyrène traitées spécialement pour ne laisser passer que les cations ou que les anions. La migration des ions s'effectue suivant le principe de la diffusion : en présence d'un gradient de concentration, les ions se déplacent des milieux les plus concentrés vers les milieux les moins concentrés.



Dans un premier temps, une solution d'eau de mer de forte concentration en sel est formée par exploitation de l'énergie solaire (ou en récupérant de la chaleur industrielle). La concentration des sels dans l'eau de mer passe de 3,5 % à 18 % ou plus (figure ci-dessus). Cette eau salée concentrée est ensuite pompée dans l'unité de dessalement, où elle circule dans un tuyau, en relation avec trois autres flux d'eau de mer, dont les concentrations en sels sont normales (3,5 %). Les relations entre ces quatre flux sont gouvernées par les jonctions en polystyrène.



1.4 Questions préliminaires

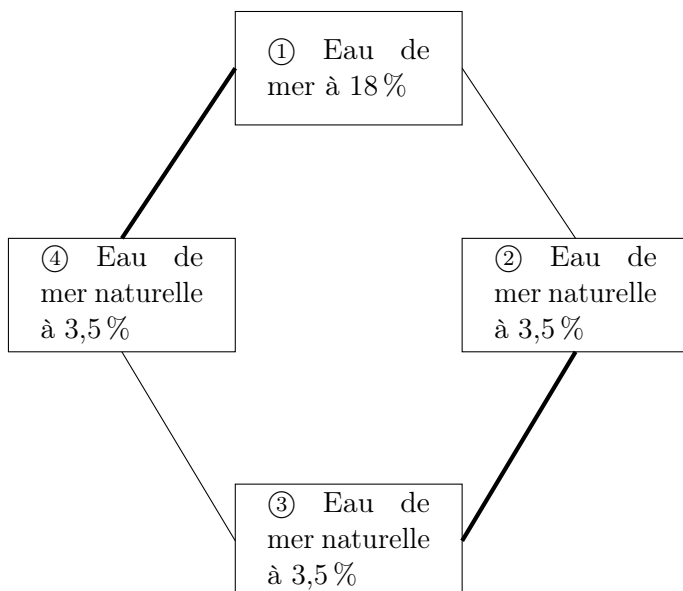
- Décrire rapidement la technique qui permet d'augmenter la concentration en sels. Que pensez-vous de sa demande énergétique ? Conclure en comparant avec les autres procédés.
- En première approximation, quels sont les deux ions majoritairement présents dans l'eau de mer ?

1.5 Question scientifique à résoudre

Comment dessaler l'eau de mer en commençant par la saler encore plus ?

1.6 Construction des étapes de la résolution

Dans les conditions initiales (date $t = 0$), la disposition relative des quatre flux d'eau salée dans l'unité de dessalement est donnée sur la figure ci-dessous.



_____ Jonction en polystyrène perméable aux anions

————— Jonction en polystyrène perméable aux cations

- Peu de temps après la mise en place des jonctions, on observe une migration d'ions. Pourquoi ?
- Préciser entre quels flux se déroule cette migration.
- Recopier le schéma et y indiquer le sens de migration et le nom des ions.

1.7 Mise en œuvre des étapes de la résolution

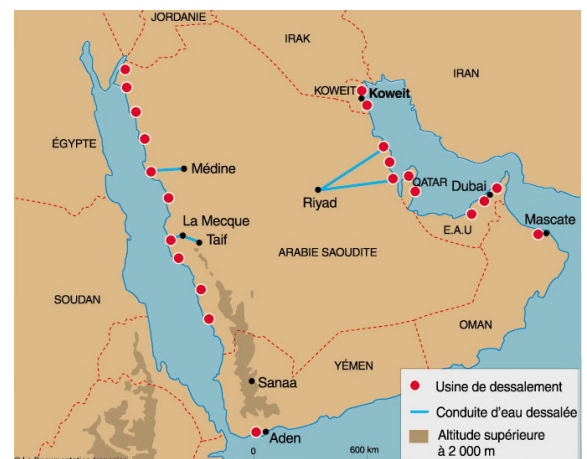
- Quelle va être la conséquence de cette migration sur les flux ② et ④ ?
- Que va-t-il donc se passer au niveau du flux ③ ? Pourquoi ? Compléter le schéma.

1.8 Regard critique sur la résolution

- Pourquoi est-il nécessaire au départ de créer une solution « hypersaline » d'eau de mer ?
- Pour simplifier, nous avons considéré uniquement la présence de deux ions dans l'eau de mer. Est-ce le cas ? Cela change-t-il le raisonnement ?
- Dans quelles conditions l'eau douce produite peut-elle être utilisée comme eau potable ?

1.9 Pour conclure

- À votre avis, dans quelle zone géographique le procédé développé par Sparrow et Zoshi sera-t-il le plus rentable ?



- Pourquoi est-il moins polluant que les autres procédés ?
- Cependant, un problème inhérent aux procédés de dessalement persiste. Lequel ?
- Conclure.

2 Activité expérimentale : Dosage du dioxygène dans l'eau (1 h)

On va déterminer si une eau du robinet est de bonne qualité, par dosage du dioxygène $O_{2(aq)}$ dissous dans l'eau.

Une des étapes du traitement des eaux usées, dans les stations d'épuration, consiste à brasser l'eau pour y dissoudre du dioxygène de l'air. Voici une photographie montrant les unités de brassage (au premier plan) dans une station d'épuration :



En effet, la concentration minimale en dioxygène nécessaire à la vie aquatique est de $4,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. L'eau usée en contient bien moins. Nous allons vérifier, en dosant le dioxygène dissous dans l'eau, si une eau potable est de bonne qualité. La méthode utilisée consiste en un titrage iodométrique indirect.

2.1 Manipulations

2.1.1 Étape 1 : réaction totale du dioxygène

Dans cette première étape, le dioxygène $O_{2(aq)}$ dissous dans l'eau est totalement détruit pour former un précipité marron.

- Introduire un barreau aimanté dans un erlenmeyer de 125 mL. Placer cet erlenmeyer dans un petit bol adapté, apte à recevoir les quelques gouttes de liquide susceptibles de déborder de l'erlenmeyer. Remplir l'erlenmeyer d'eau du robinet à ras bord (une moitié des binômes fera de même avec de l'eau du robinet préalablement aérée pendant 2 minutes).
- Ajouter 1,0 g de chlorure de manganèse (II) $MnCl_{2(s)}$ et 0,8 g de pastilles d'hydroxyde de sodium $NaOH_{(s)}$ (soude, environ 4 pastilles).

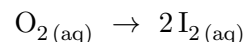
Nota bene : les prélèvements s'effectuent au bureau avec votre coupelle préalablement tarée et la spatule correspondant à chaque produit, spatule qui reste au bureau, et le transvasement dans l'erlenmeyer s'effectue à votre place avec votre propre spatule.

- Boucher rapidement sans emprisonner d'air et agiter pendant 30 minutes ; un précipité marron d'hydroxyde

de manganèse (III) $Mn(OH)_3_{(s)}$ se forme.

2.1.2 Étape 2 : ajout d'un excès d'ions iodure

Dans cette deuxième étape, le précipité marron est totalement détruit pour former du diiode, de telle sorte qu'il se forme deux molécules de diiode $I_{2(aq)}$ pour chaque molécule de dioxygène $O_{2(aq)}$ précédemment consommée :



- Au bout de 30 minutes, verser la totalité du mélange dans un erlenmeyer de 250 mL, barreau aimanté inclus.
- Ajouter immédiatement et avec les plus grandes précautions 5 mL d'acide sulfurique concentré H_2SO_4 .

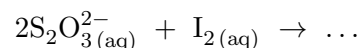
Nota bene : l'acide sulfurique doit être versé sous la hotte. Cette opération est dangereuse et peut mener à des projections dantesques. Gants, lunettes, blouse et hotte fermée au maximum possible. Les gants utilisés sont souillés et ne doivent pas être conservés après cette étape.

- Ajouter 1,5 g d'iodure de potassium et agiter. La coloration brune doit disparaître.

Nota bene : n'oubliez pas que la solution reste assez fortement acide, pensez à vous laver les mains dans la minute en cas de contact, le risque principal étant de se frotter les yeux par inadvertance avec des mains souillées... Pour ne pas finir aveugle ! Et le diiode formé, quoiqu'en faible concentration, provoque des taches indélébiles.

2.1.3 Étape 3 : dosage du diiode

Dans cette troisième étape, deux molécules de thiosulfate $S_2O_3^{2-}_{(aq)}$ sont nécessaires pour doser une molécule de diiode $I_{2(aq)}$:



- Prélever $V_0 = 50,0 \text{ mL}$ de solution précédente, à verser dans un bécher.

Nota bene : vous disposez d'une pipette jaugée de 25,0 mL pour effectuer ce prélèvement précisément. Attention, la solution est assez acide, éliminer rapidement toute goutte sur le plan de travail.

- Récupérer (à l'aide de la baguette magique), rincer et sécher le barreau aimanté, et le placer dans le bécher précédent.
- Préparer la burette graduée avec la solution de thiosulfate de sodium $2Na^+_{(aq)} + S_2O_3^{2-}_{(aq)}$ de concentration $c_1 = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Nota bene : bien rincer la burette avec quelques millilitres de solution et bien prendre garde à ne pas laisser de bulle (appel du professeur pour vérification).

- Réaliser le titrage en disposant une feuille blanche pour mieux apprécier la disparition de la coloration du diiode et en ajoutant de l'empois d'amidon (thiodène) un peu avant l'équivalence. Noter les valeurs de V_{1E} afin de procéder à une moyenne.

2.2 Relation à l'équivalence

o. Dans un premier temps, les ions manganèse (II) réagissent avec les ions hydroxyde pour donner de l'hydroxyde de manganèse (II), $MnO_{2(s)}$.

Écrire l'équation de cette réaction, notée (1).

p. Le dioxygène dissous dans l'eau oxyde ensuite lentement l'hydroxyde de manganèse (II) en hydroxyde de manganèse (III).

Écrire l'équation de cette réaction, notée (2), sachant que les couples mis en jeu sont (O_2/H_2O) et ($Mn(OH)_3/Mn(OH)_2$).

q. Dans la première étape, les ions oxonium $H_3O_{(aq)}^+$, libérés par l'acide sulfurique transforment l'hydroxyde de manganèse (III) en ion manganèse (III).

Écrire l'équation de cette réaction, notée (3).

r. Les ions iodure $I_{(aq)}^-$, introduits en excès, réagissent alors avec les ions manganèse (III) pour former des ions manganèse (II) et du diiode $I_{2(aq)}$.

Écrire l'équation de cette réaction d'oxydoréduction, notée (4).

s. À l'aide des équations précédentes et en dressant éventuellement des tableaux d'avancement, montrer que les quantités de dioxygène dissous $n(O_2)$ et d'ions manganèse (III) $n(Mn^{3+})$ produits lors de la réaction (3) sont liées par la relation :

$$n(Mn^{3+}) = 4n(O_2)$$

t. Montrer ensuite que les quantités de diiode $n(I_2)$ formées lors de la réaction (4) et celle d'ions manganèse (III) $n(Mn^{3+})$ sont liées par la relation :

$$n(Mn^{3+}) = 2n(I_2)$$

u. Écrire l'équation de la réaction de titrage, notée (5), sachant que les couples redox mis en jeu sont (I_2/I^-) et ($S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}$).

v. En déduire que les quantités d'ions thiosulfate $n(S_2O_3^{2-})$ versées jusqu'à décoloration et de diiode $n(I_2)$ présentes sont liées par la relation :

$$n(S_2O_3^{2-}) = 2n(I_2)$$

2.3 Exploitation des mesures

w. On peut montrer que la relation entre la quantité de dioxygène dissous $n(O_2)$ et la quantité de thiosulfate versé à l'équivalence $n(S_2O_3^{2-})$ est telle que :

$$n(S_2O_3^{2-}) = 4 \cdot n(O_2)$$

En déduire la relation entre $n(O_2)$, c_1 et V_{1E} .

x. En déduire la concentration molaire $[O_2]$ en dioxygène dans l'eau.

y. En déduire la concentration ou titre massique t_{O_2} en dioxygène dans l'eau.

z. Conclure quant à la qualité de l'eau, à l'aide du tableau ci-dessous.

t_{O_2} (mg·L ⁻¹)	Qualité	Usages
> 7	excellente	consommation
5 – 7	bonne	industrie
3 – 5	moyenne	irrigation
1 – 3	mauvaise	refroidissement
< 1	très mauvaise	navigation

3 Correction des exercices de la séance n° 18

18.1 Activité n° 1 p. 30 – L'eau douce sur Terre

1. a. Les eaux de surface peuvent naître de la fonte des glaciers, du ruissellement des pluies, de la résurgence des eaux souterraines.

b. Volume du lac Baïkal :

$$\begin{aligned}V_{\text{lac Baïkal}} &= 0,13 \times 0,20 \\ &= 0,026 \text{ million de km}^3 \\ &= 2,6 \times 10^4 \text{ km}^3\end{aligned}$$

soit environ les 23 000 km³ annoncés en légende de la photographie du document 2.

2. Les ressources mondiales disponibles sont à elles seules insuffisantes pour alimenter les populations.
3. L'empreinte d'un état sur l'eau est le volume d'eau nécessaire pour la production des biens et des services consommés par ses habitants :

- 2483 m³ par personne et par an aux États-Unis (696 × 10⁹ m³/an) ;
- 2332 m³ par personne et par an en Italie (140 × 10⁹ m³/an) ;
- 1875 m³ par personne et par an en France (110 × 10⁹ m³/an) ;
- 1682 m³ par personne et par an en Suisse (12 × 10⁹ m³/an) ;
- 1103 m³ par personne et par an en Pologne (43 × 10⁹ m³/an) ;
- 675 m³ par personne et par an en Éthiopie (43 × 10⁹ m³/an) ;

La moyenne mondiale est de 1243 m³ par personne et par an (7452 × 10⁹ m³/an).

4. Soit V le volume à évaluer. Dans le document 2, on évalue le volume à 9,5 millions de km³.

$$V = 1400 \times 0,03 \times 0,26 = 11 \text{ millions de km}^3$$

D'après le document 3, la consommation mondiale est voisine de 7500 × 10⁹ m³/an, c'est-à-dire 7500 km³/an. En l'absence de renouvellement de ces eaux et pour la seule consommation, 1500 années de ressources seraient a priori disponibles.

Ces réserves ne suffisent pas, car elles sont inégalement réparties, puisque 26 pays reçoivent moins de 1000 m³ d'eau par an et par habitant.

L'une des principales conséquences se situe dans la désertification des pays. Les ressources alimentaires agricoles, directement dépendantes de l'eau, sont particulièrement exposées.

18.2 Activité n° 2 p. 31 – L'eau potable

1. Une eau salée contient des « sels » dissous (chlorure de sodium, sulfate de magnésium, etc.) et pas seulement du « sel » (chlorure de sodium).

Une eau saumâtre est une eau salée, mais de concentration inférieure à celle de l'eau de mer (donc généralement comprise entre 1 et 10 g·L⁻¹).

2. a. Pour comprendre la nécessité de réduire la pression dans l'effet ($n + 1$), il faut regarder le document 3 qui donne l'évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression. Lorsque la pression diminue, la température d'ébullition diminue aussi : l'eau s'évapore à une température plus basse.

b. La vapeur produite dans le premier effet se condense pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression inférieure.

c. L'énergie thermique est cédée au milieu extérieur lors d'une condensation.

d. Le procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. Dans le premier effet, l'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. L'énergie thermique transférée au travers de cette surface est apportée par la vapeur produite par la chaudière. L'énergie qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet (et ainsi de suite).

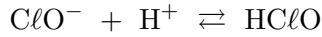
Seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique.

3. L'eau de mer est chauffée par la vapeur dans une chaudière à saumure. Elle est maintenue sous pression pendant le chauffage. Vers une température de l'ordre de 120 °C, l'eau est introduite dans une enceinte où règne une pression réduite. L'eau se vaporise instantanément par détente, appelée *ash*. La fraction de l'eau évaporée se recondense sur des tubes et l'eau liquide est recueillie. Dans le procédé de distillation à détentes étagées (ou MSF pour *Multi-Stage Flash distillation*), l'évaporation et la condensation sont répétées par détentes successives dans des chambres à pressions de plus en plus réduites.

4. L'homme (et surtout la femme...) a besoin de sels minéraux pour vivre. S'il ne buvait que de l'eau pure (sans sels dissous), des phénomènes d'osmose viendraient appauvrir l'organisme en ions dissous.

18.3 Activité n° 4 p. 33 – Le traitement des eaux

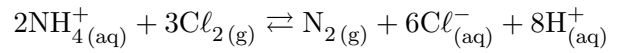
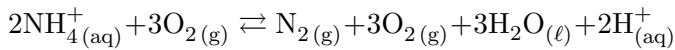
1. a. L'adsorption est le phénomène par lequel des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant).
- b. Selon la taille des pores des membranes utilisées, des molécules de tailles différentes seront retenues.
2. a. Elle se justifie du fait de l'équation suivante :



b.



3.



4. a. Les traitements subis par une eau brute sont le dégrillage, le tamisage, la coagulation, la décantation, la filtration, l'ozonation et la chloration.
- b. Les normes européennes de potabilité sont détaillées dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Je vous en recommande chaleureusement la lecture en cas d'insomnie persistante.

4 Exercices pour la séance n° 19

19.1 n° 4 p. 44 – Recovery magnesium from sea water

19.2 n° 5 p. 45 – Adoucissement et dessalement

19.3 n° 7 p. 46 – Titration conductimétrique des ions sulfate

19.4 Activité n° 3 p. 32 – Production d'eau potable et écologie