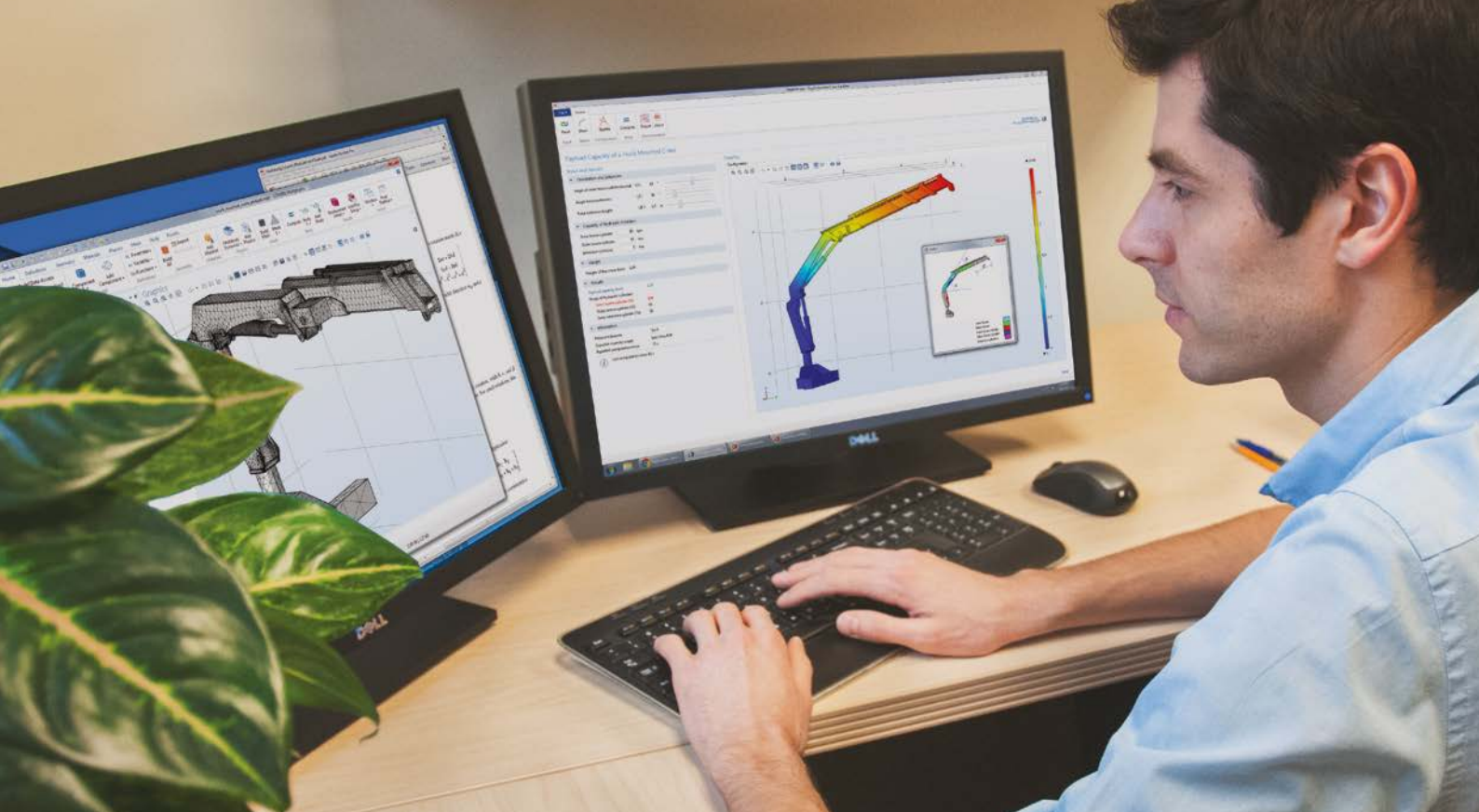




LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

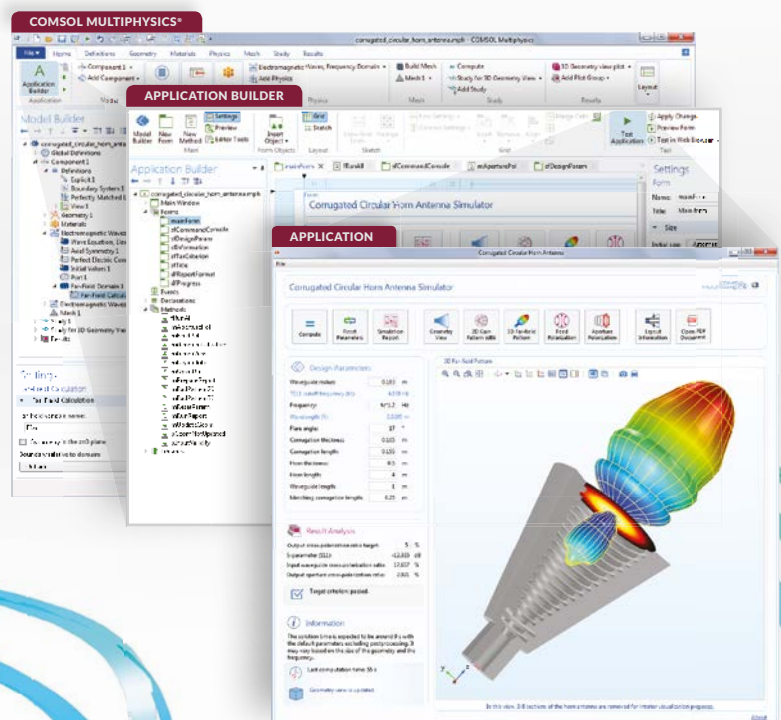
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



IDÉES DE PHYSIQUE

L'énergie du sel

L'osmose entre eau douce et eau salée séparées par une membrane imperméable au sel peut être la source d'une nouvelle énergie renouvelable.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Gâce à son sel, chaque mètre cube d'eau de mer a le potentiel de fournir une énergie de près de un kilowattheure !

Comment ? En mettant à profit la pression dite osmotique qui naît lorsqu'on met en contact de l'eau douce et de l'eau de mer à travers une paroi ne laissant passer que l'eau. La récupération de cette énergie liée au phénomène d'osmose n'en est qu'à ses balbutiements, mais les perspectives sont alléchantes : compte tenu des énormes quantités d'eau déversées dans les océans par les fleuves, on évalue le potentiel mondial pour cette énergie à deux térawatts, soit l'équivalent de 2 000 cœurs de réacteur électronucléaire. Mais au fait, qu'est-ce que l'osmose ?

Pression osmotique

Nous avons tous rencontré ce phénomène à une occasion ou une autre. Par exemple, on saupoudre souvent de sel les concombres ou les aubergines pour les faire dégorger, c'est-à-dire pour qu'ils se vident d'une partie de leur eau. Inversement, en plaçant dans de l'eau pure des fleurs aux tiges ramollies, celles-ci absorbent de l'eau et se raffermissent.

Pourquoi ces mouvements d'eau, que l'on peut reproduire très simplement avec une pomme de terre (voir ci-contre) ? Ils apparaissent lorsque la concentration en sel de l'intérieur

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique/

des cellules végétales (9 grammes par litre) diffère de la concentration du liquide ambiant, sachant que les membranes cellulaires sont « hémiperméables » : elles laissent passer l'eau, mais pas le sel. L'eau s'écoule alors dans le sens qui permet de diminuer la différence des concentrations en sel.

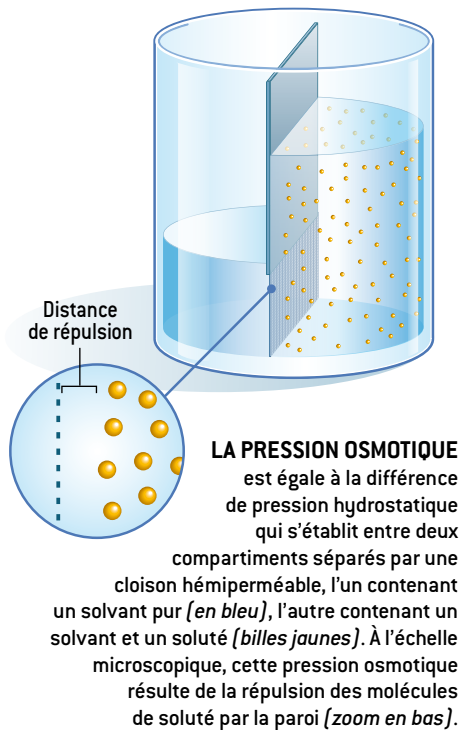
Pour comprendre comment agissent ces membranes, considérons un récipient ouvert, séparé en deux compartiments par une paroi hémiperméable dans sa partie inférieure. L'un des compartiments contient un solvant pur, de l'eau par exemple, tandis que l'autre contient le solvant et, en faible concentration, un soluté incapable de traverser la paroi – du sel par exemple. Cela signifie que la paroi exerce d'une façon ou d'une autre une force très répulsive sur les molécules du soluté quand elles s'en approchent. Ainsi seul le solvant peut traverser la paroi hémiperméable, dans un sens comme dans l'autre.

Cette dissymétrie des forces exercées par la paroi sur le solvant et le soluté a deux conséquences. La première concerne la situation d'équilibre. Faisons dans ce cas un bilan des forces de part et d'autre de la cloison. Du côté du solvant pur, la force totale est celle exercée par la paroi sur les molécules du solvant. Dans l'autre compartiment, certaines molécules du solvant sont remplacées par des molécules de soluté ; or pour celles qui sont proches de la paroi, la force est, en moyenne, répulsive



L'OSMOSE EN PATATES. Creusons deux cavités dans une moitié de pomme de terre, l'une qu'on remplit d'eau pure, l'autre où l'on met un peu de sel. Quelques heures plus tard, la première cavité s'est vidée, tandis que la seconde s'est remplie d'eau. C'est la manifestation de l'osmose, qui tend à égaliser les concentrations en sel de part et d'autre d'une membrane perméable à l'eau mais imperméable au sel.

Dessins de Bruno Vicario



et supérieure à celle exercée sur les molécules de solvant. Il s'ensuit que la force exercée par la paroi sur le fluide, et donc la pression, est supérieure du côté du soluté. La différence de pression est nommée pression osmotique.

La seconde conséquence concerne la situation hors d'équilibre, par exemple quand la pression hydrostatique est initialement égale dans les deux compartiments. L'effet dissymétrique de la paroi n'étant plus compensé, on a un mouvement du solvant vers le compartiment contenant le soluté. Ce système fonctionne donc comme une pompe à solvant, jusqu'à ce que l'équilibre des pressions soit atteint.

Ainsi, quand on part d'une situation où les liquides sont au même niveau dans les deux compartiments, le compartiment contenant le solvant pur va lentement se vider au profit du compartiment contenant le solvant et le soluté : un dénivelé apparaît entre les deux compartiments, et augmente jusqu'à ce que la différence de pression hydrostatique soit égale à la pression osmotique (*voir la figure ci-dessus à gauche*).

Le calcul de la pression osmotique P débouche sur un résultat remarquablement simple : P ne dépend ni de la nature du solvant, ni de celle du soluté, ni des forces exercées par les parois, mais uniquement de la densité molaire n du soluté. En fait, l'expression de P est identique à celle de la

pression d'un gaz parfait de même densité (soit $P = nRT$).

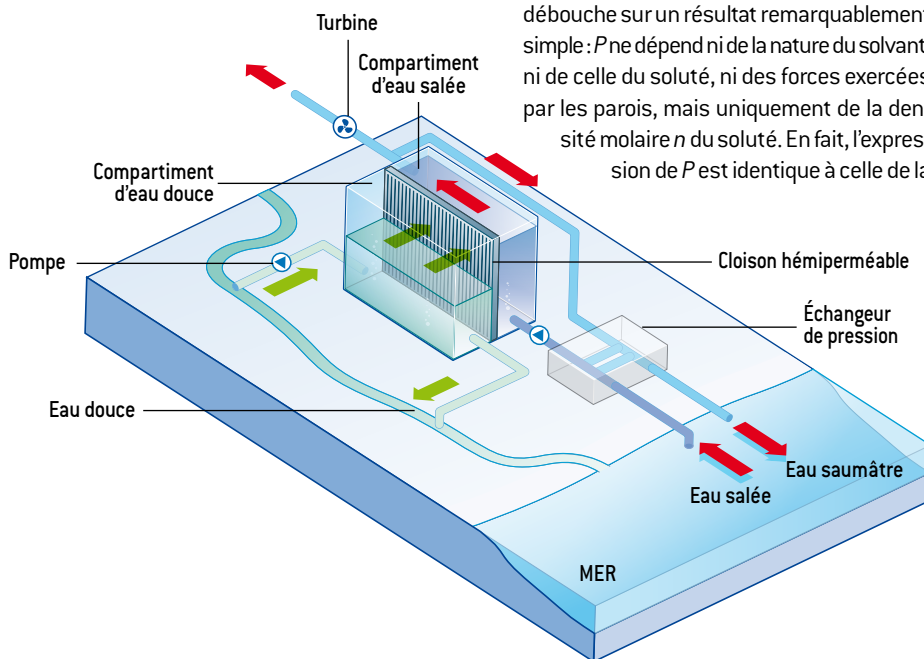
Quelle différence de pression peut-on alors espérer avec de l'eau pure et de l'eau salée ? Pour un gaz à température ambiante, on a une pression de 1 bar lorsque sa densité est d'environ 0,04 mole par litre. Pour du chlorure de sodium (sel de table), dont la masse molaire est de 58 grammes par mole et en prenant en compte le fait qu'il y a deux ions (Na^+ et Cl^-) par mole de sel, cela correspond à une masse d'un peu moins de 1,2 gramme. On a donc, en gros, 1 bar pour 1 gramme de sel par litre. Or 1 bar est l'équivalent de la pression d'une colonne d'eau de 10 mètres. Avec de l'eau de mer à 30 grammes de sel par litre, on aura par conséquent 30 bars, soit une hauteur d'eau de 300 mètres !

Faire tourner une turbine

Comment exploiter la pression osmotique pour réaliser une centrale électrique ? Imaginons que, à l'embouchure d'une rivière, on place deux réservoirs séparés par une membrane hémiperméable, l'un alimenté par l'eau salée de la mer, l'autre par l'eau douce de la rivière. L'eau douce est alors pompée par le réservoir « salé » qui se remplit jusqu'à une hauteur de 300 mètres, un dénivelé idéal pour installer un barrage hydroélectrique. En pratique, pas besoin de construire une structure aussi haute : l'eau sous pression du côté salé peut directement faire tourner une turbine génératrice d'électricité (*voir la figure ci-contre*).

Le principe est aisé, mais la réalisation est délicate. L'obstacle principal est le flux d'eau que l'on peut obtenir. Dans une vision très simplifiée, une membrane hémiperméable fonctionne comme un tamis moléculaire : ses pores sont assez étroits pour laisser passer les molécules d'eau, mais pas les ions et les molécules qu'ils entraînent. Les pores étant nanométriques, les débits attendus sont faibles, de l'ordre du millilitre par seconde et par mètre carré de membrane. En termes de puissance, cela correspond à 3 watts par mètre carré.

Pour faire tourner une turbine, il faut donc une surface considérable de parois. Le prototype construit en Norvège par Statkraft



ON PEUT PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ en mettant sous pression de l'eau salée (eau de mer) grâce à l'osmose, qui fait entrer de l'eau douce dans le compartiment d'eau salée. Cette eau sous pression, devenue saumâtre, est partiellement évacuée à travers une turbine, qui produit de l'électricité. Une autre partie passe à travers un dispositif qui permet de transférer son excès de pression à l'eau de mer qui alimente le circuit.

présente ainsi une superficie totale de 2 000 mètres carrés, pour un débit de quelques litres par seconde et une puissance évaluée à quelques kilowatts.

Une seconde difficulté est le renouvellement de l'eau salée. À mesure que le réservoir « salé » se remplit, la salinité de son eau diminue. Il faut renouveler cette saumure, de plus en plus diluée et qui chute en pression, par l'eau salée de la mer. Or cette saumure est sous pression par rapport à l'eau de la mer, à pression atmosphérique. Pour ne pas gaspiller trop d'énergie dans ce processus, les ingénieurs ont inventé des « échangeurs de pression », un analogue mécanique des échangeurs de chaleur, qui permettent de passer de la situation « eau salée à faible pression et saumure sous pression » à l'objectif « eau salée sous pression et saumure à faible pression ».

Quant aux perspectives industrielles, on estime qu'une centrale osmotique sera rentable à partir de 5 watts par mètre carré de paroi hémiperméable. Les performances actuelles n'étant pas très éloignées, les ingénieurs cherchent à améliorer les procédés. Une autre piste suivie par les physiciens est d'améliorer les parois grâce à une meilleure compréhension des écoulements ou des transports de particules à l'échelle nanométrique.

Récemment, l'équipe de Lydéric Bocquet, du CNRS et de l'université Lyon 1, a ainsi étudié l'écoulement osmotique de l'eau à travers un tube de nitrure de bore de quelques dizaines de nanomètres de diamètre. Il s'effectue presque sans frottement, avec un potentiel de 4 kilowatts par mètre carré. Ce résultat ne concerne qu'un nanotube, certes, mais montre que de grands progrès sont possibles du côté des membranes hémiperméables. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Siria *et al.*, **Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube**, *Nature*, vol. 494, pp. 455-458, 2013.

B. E. Logan et M. Elimelech, **Membrane-based processes for sustainable power generation using water**, *Nature*, vol. 488, pp. 313-319, 2012.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr



Dans l'interêt de la science

mathieu vidard

|

la tête au carré
14:05-15:00

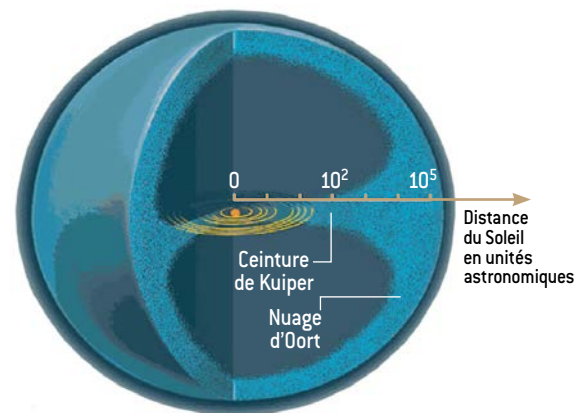


QUESTION AUX EXPERTS

D'où viennent les comètes ?

Ces corps célestes glacés sont issus de trois « réservoirs » du Système solaire : le nuage d'Oort, la ceinture de Kuiper et la ceinture principale d'astéroïdes.

Alain DORESSOUNDIRAM



Les comètes sont des petits corps glacés en orbite autour du Soleil. Avec les astéroïdes, elles constituent l'ensemble des petits corps du Système solaire, des vestiges de la formation du Soleil et des planètes il y a 4,6 milliards d'années. On confond souvent les comètes avec les étoiles filantes ou les météorites. Un météore ou une étoile filante est le phénomène lumineux associé au passage d'un corps – grain de sable, astéroïde... – dans la haute atmosphère. Une météorite est un fragment d'astéroïde qui arrive intact sur Terre. Et une comète est un corps glacé qui s'évapore en s'approchant du Soleil.

Les comètes sont composées de glaces (essentiellement d'eau, mais aussi de méthane, de monoxyde ou dioxyde de carbone) mélangées à de la poussière (des silicates) et des molécules organiques – lesquelles font l'intérêt de ces corps pour ceux qui étudient l'apparition de la vie sur Terre.

Une comète se distingue d'un astéroïde par le fait que c'est un objet actif, donc variable. À l'approche du Soleil, sa surface chauffe, les glaces se subliment, libérant des poussières qui forment alors la « chevelure », ou coma, faiblement retenue par la gravité. La coma s'étend ainsi en halo, de diamètre allant jusqu'à 10 000 kilomètres, autour de la comète. En s'approchant encore du Soleil, le gaz de la coma est ionisé par les ultraviolets de notre étoile. Le vent solaire (vent de particules chargées) repousse alors les ions dans la direction opposée, formant une queue de plasma. La pression de

radiation du Soleil (flux de lumière) repousse les poussières et forme une seconde queue. Ces deux queues s'étendent parfois jusqu'à 100 millions de kilomètres et concourent à la majesté du phénomène.

Les comètes doivent s'être formées très loin du Soleil, là où les glaces ont pu se condenser, puis s'agglomérer en corps plus gros. En observant les trajectoires des comètes, qui arrivent de toutes les directions, l'astronome néerlandais Jan Oort, dans les années 1950, imagina un réservoir lointain et sphérique : le nuage d'Oort. Peuplée de quelque 1 000 milliards de comètes, cette sorte de coquille entourant le Système solaire serait distante de 10 000 à 100 000 unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique, UA, est la distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de kilomètres).

Des réservoirs identifiés il n'y a pas si longtemps

Cependant, le flux de comètes présente un excès de celles qui arrivent dans le plan de l'écliptique (le plan moyen des orbites planétaires). Dans les années 1980, l'astronome uruguayen Juan Fernández suggéra alors l'existence d'un second réservoir, beaucoup plus proche et, surtout, situé dans le plan de l'écliptique : la ceinture de Kuiper. Ce réservoir ne fut observé qu'en 1992, par les Américains Dave Jewitt et Jane Luu.

Comme les autres objets du Système solaire, les comètes décrivent des ellipses

autour du Soleil. Mais à la différence des planètes et des astéroïdes, ces orbites sont très allongées. Selon leur origine, on distingue deux grandes familles de comètes.

Les comètes écliptiques proviennent de la ceinture de Kuiper. Elles en ont été éjectées par les perturbations gravitationnelles dues à Neptune. L'inclinaison de leur orbite par rapport à l'écliptique est faible et leur période de révolution courte (inférieure à 200 ans). La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, actuellement étudiée par la sonde *Rosetta*, fait partie de cette famille.

Les comètes quasi isotropiques proviennent du nuage d'Oort. Leurs périodes sont en général très longues, et leurs orbites très inclinées et souvent rétrogrades (en sens inverse du sens des planètes). Un représentant célèbre est la comète de Halley.

Des découvertes très récentes font état de la présence de comètes au sein même de la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter. Comment expliquer l'activité de ces « comètes de la ceinture principale », ou CCP, activité qui les distingue des astéroïdes ? Les scientifiques sont encore perplexes. La glace d'eau, à cette faible distance du Soleil (entre 3 et 4 UA), est instable. Il peut en revanche subsister des poches de glace sous la surface d'un astéroïde. Des impacts peuvent alors révéler la glace souterraine et « activer » l'astéroïde, qui devient alors comète. ■

Alain DORESSOUNDIRAM est astrophysicien à l'observatoire de Paris, au laboratoire LESIA.