Hubert Reeves, Yves Lancelot

La mer expliquée à nos petits-enfants

«La mer nous est indispensable!

Ce que la science nous a appris sur les origines de la mer, sa nature physique, ses mouvements, son rôle dans les changements climatiques, oblige à la regarder comme le cœur d'un système global dont dépend l'équilibre de la planète.

Pour lui donner toute sa mesure, nous avons uni nos connaissances et nos regards: l'astrophysicien pour raconter le rôle de la mer dans le Système solaire et dans l'Univers et l'océanographe pour l'observer depuis la Terre, en plongeant dans ses profondeurs extrêmes.

Nous allons laisser à nos petits-enfants cette planète dans un état précaire; ils savent qu'ils devront en prendre soin. Aussi souhaitons-nous éveiller leur curiosité. Et qu'ils gardent cette capacité d'émerveillement que nous aimons tant voir briller dans leurs yeux...»

Hubert Reeves, astrophysicien, est l'auteur de nombreux ouvrages appréciés d'un vaste lectorat.

Yves Lancelot est océanographe, ancien directeur de recherche au CNRS et professeur des universités.

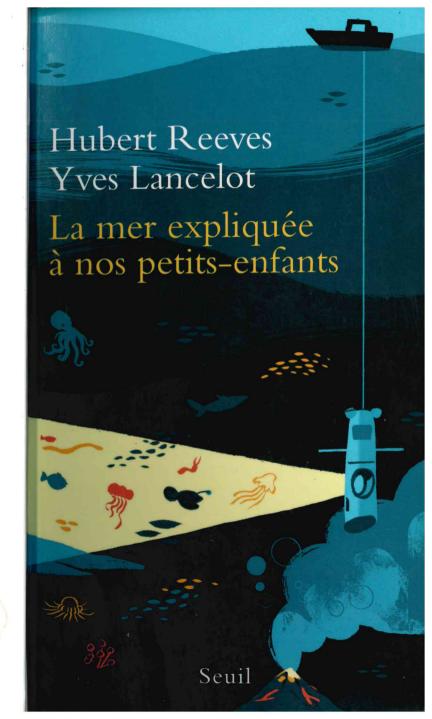


www.seuil.com

Illustration: Olivier Balez

Imprimé en France 01.15 ISBN: 978.2.02.109820.4 214

8€



climatiques, oblige à la regarder autrement : non pas comme un des éléments parmi d'autres présents à la surface de la Terre mais comme le cœur d'un système global dont dépend l'équilibre de la planète.

La mer nous est indispensable!

Pour lui donner toute sa mesure, nous avons uni nos connaissances et nos regards. Il fallait un astrophysicien (Hubert Reeves) pour raconter sa place dans l'Univers et expliquer ce qu'elle nous apprend sur le Système solaire. Il fallait un océanographe (Yves Lancelot) pour l'observer depuis la Terre, en plongeant dans ses profondeurs extrêmes. C'est ainsi que nous avons répondu d'une seule voix aux questions de nos petits-enfants.

Comme les jeunes de leur génération, ils vont hériter de la planète dans l'état précaire où nous la leur laissons. Plus que nous à leur âge, ils sont déjà sensibles à sa fragilité et savent qu'ils devront en prendre soin. Aussi avonsnous voulu les aider à comprendre à leur tour les mystères de la vie, à susciter leur curiosité pour leur donner envie de savoir, de chercher, de découvrir et à préserver toute leur capacité d'émerveillement. Nous, savants grands-pères, l'avons gardée intacte et nous aimons tant la voir briller dans les yeux de nos petits-enfants...

Hubert Reeves, Yves Lancelot

Puisque nous sommes ensemble pour parler de la mer, venez, allons la voir! J'adore venir ici, m'asseoir sur ces rochers et ne penser à rien en regardant l'horizon...

Tu as raison : pour raconter la mer, il faut commencer par la contempler! Mais telle que je te connais, tu ne vas pas « ne penser à rien » bien longtemps, comme tu le crois.

Si, je t'assure. La mer, ça me vide la tête. Je la trouve immense et belle. J'aime la lumière du soleil qui n'arrête pas de changer, le sable mouillé qui scintille à marée basse, le bruit des vagues et des mouettes. Et toi, à quoi te fait-elle penser?

À la liberté, au ciel, aux étoiles, à l'envie de partir. « Homme libre, toujours tu chériras la mer ». J'aime beaucoup ce vers de Baudelaire.

C'est vrai, moi aussi, je me sens plus libre, j'oublie les trucs qui m'énervent, je respire, je m'évade...

Et pourtant l'évasion définitive est impossible!

Si, elle est possible : il suffit d'embarquer sur un bateau. Toi-même, tu l'as fait des centaines de fois.

Oui, mais on a beau partir loin et longtemps, on revient toujours, parce que la mer n'est pas faite pour la vie humaine. D'ailleurs, c'est peut-être pour cette raison qu'elle nous attire. Certes, nous pouvons y vivre assez bien quelques mois sur un bateau. Mais fondamentalement, nous ne pouvons pas l'habiter, ce n'est pas notre milieu naturel. Nous voilà assis sur ces rochers, tu vois toute cette eau devant nous, immense, comme tu l'as dit? Sais-tu qu'elle occupe les trois-quarts de notre planète? Et pourtant nous, les terriens, nous n'y avons pas de place! Tu te rends compte?

Je n'y avais jamais pensé! Alors, c'est comme un autre monde...

Oui, elle est autre et plus forte que nous. La mer est dans notre monde et en même temps, elle nous échappe toujours. Tu pourrais avoir la même sensation sous le ciel étoilé en songeant à l'immensité de l'Univers, dans lequel notre espace vital ne représente presque rien. Sauf que la mer nous est plus proche : elle est là, elle fait partie de l'histoire terrienne, tu peux la toucher, t'y baigner...

Et surtout, elle fait rêver. Par exemple, quand j'étais petite, je me demandais où elle finissait. Je vois l'horizon, très loin, et je sens que cet horizon n'est pas la limite de la mer. Ce n'est pas le bord d'une immense piscine, il y a forcément quelque chose

derrière, et quand j'aperçois les bateaux disparaître petit à petit à l'horizon, je sais bien qu'ils n'ont pas coulé ou qu'ils ne sont pas tombés de l'autre côté. Ils sont ailleurs, si loin que, même en prenant la mer à mon tour, je ne pourrai jamais les atteindre. J'ai l'impression que je me demanderai toujours : où ça finit, la mer? C'est un peu idiot comme question, non?

Pas du tout. C'est au contraire une belle question et je me la posais aussi quand j'étais petit. Même si j'ai passé ma vie à étudier les océans, cette question me fascine toujours autant, comme toi : qu'est-ce qu'il y a derrière l'horizon? Tu connais évidemment la réponse si tu regardes un globe terrestre, et pourtant, cela n'épuise pas cette sorte de mystère que tu ressens. En cosmologie, ce qu'on appelle horizon n'est pas tout à fait cette ligne que tu vois là-bas, où la mer et le ciel se confondent. Pourtant, l'interrogation reste la même. Nous pouvons observer les galaxies mais seulement jusqu'à un certain point et les scientifiques se demandent aussi : qu'y a-t-il au-delà de ce que nous voyons? Y a-t-il d'autres univers? Oui, l'immensité, ca fait réfléchir. On ne pense pas à rien, on pense très vite, et à des tas de choses essentielles. Face à elle, ce n'est pas une mais dix questions qui surgissent, essaie!

D'où vient toute cette eau? Est-ce la même depuis le début? Était-elle sur la planète avant les continents ou les a-t-elle recouverts? Y a-t-il une seule mer ou plusieurs?

Bravo! Tu vois comme tu arrives vite aux fondamentaux!

La mer vient de l'espace

Merci du compliment, mais maintenant, il faut que tu répondes aux questions!

Commençons par la plus simple : oui, il y a une seule mer, au sens où tout cela, cette étendue d'eau salée, c'est « la mer », et d'ailleurs on n'a pas tort de dire qu'on est « au bord de la mer », que l'on soit comme nous en ce moment en Bretagne devant l'océan Atlantique. ou devant la Manche, ou sur la rive de la Méditerranée. Mais en géographie, on appelle cette mer mondiale « océan », que l'on a subdivisé en trois grands ensembles (Pacifique, Atlantique et Indien) auxquels il faut ajouter l'Arctique et l'Antarctique aux deux pôles. On réserve le mot « mer » à certaines petites portions de ces océans, en général près des côtes. Les riverains les ont nommées au fil du temps. On en identifie une quinzaine. On parlera de la mer du Nord, de la mer de Norvège, de la mer Méditerranée, de la mer Jaune, de la mer Rouge, de la mer Caspienne, de la mer Morte...

Je repose ma question : comment la mer est-elle arrivée sur la Terre ?

Il y a plusieurs explications possibles. D'abord, il faut te dire que l'eau était présente dans l'Univers bien avant la formation de la Terre et on observe encore aujourd'hui de grandes quantités de vapeur d'eau dans les nébuleuses qui parsèment la Voie lactée ainsi qu'au voisinage des étoiles en formation. Il y en a des millions de fois plus que dans toutes les mers terrestres!

Alors, la mer vient des étoiles?

Elle vient de l'espace. L'hypothèse la plus classique, mais probablement dépassée aujourd'hui, est que l'eau de la mer provient du dégazage d'une partie des matériaux en fusion de l'intérieur de la Terre, très tôt dans l'histoire de la planète. Des gaz très chauds se seraient dégagés de ce magma et, en se refroidissant, se seraient condensés, provoquant une sorte de déluge au cours duquel l'eau se serait accumulée dans les creux de la surface terrestre. Mais une autre théorie, plus récente, voudrait que l'eau provienne de collisions avec des comètes.

Des comètes pleines d'eau, comme des bombes à eau qui auraient explosé?

Oui, c'est à peu près ce qui s'est produit. Quand notre Terre et le Soleil naissent, il y a 4,57 milliards d'années, notre Galaxie existe depuis une dizaine de milliards d'années et la matière galactique est déjà abondamment enrichie en eau. Le Soleil est entouré d'un cortège planétaire dont fait partie notre future planète, la Terre. Plus loin, se trouve un gigan-

tesque nuage de comètes largement constituées de glace. Tous ces corps célestes qui tournoient autour du Soleil entrent en collision avec la Terre de nombreuses fois durant les premiers millions d'années de sa formation. Les comètes auraient alors libéré de très grandes quantités d'eau qui se seraient répandues à la surface de la Terre.

On a longtemps considéré les comètes, quand elles apparaissent dans nos cieux, comme de mauvais augures annonçant des cataclysmes. Nous savons à présent qu'elles nous ont au contraire apporté un sublime cadeau : l'eau, qui est l'élément fondamental pour l'apparition de la vie, donc pour notre existence. Nous leur devons tout !

Quand je nage dans l'océan, je me baigne encore dans l'eau venue de ces comètes?

Oui, c'est la même eau depuis le début, mais pas dans les mêmes bassins. Les océans tels que nous les connaissons sont beaucoup plus jeunes que la Terre puisqu'ils se sont formés il y a seulement 200 millions d'années, mais ils contiennent une eau bien plus vieille qu'eux. Et, chose extraordinaire, leur volume total est constant, quelle que soit la forme des bassins, et n'a pas varié au fil des millions d'années. Bien sûr, sous l'effet de la chaleur du soleil, l'eau s'évapore, puis retombe en pluie (ce qui d'ailleurs nous permet d'avoir de l'eau douce et

potable), mais ce recyclage ne concerne qu'une infime part de la masse d'eau totale.

L'eau, c'est la vie?

Tu disais que l'eau est la source de la vie, cela veut dire qu'il ne peut y avoir de vie que sur la Terre... si du moins il n'y a pas d'eau sur d'autres planètes?

Justement! Il est possible qu'il y ait de l'eau, ou qu'il y en ait eu, sur d'autres planètes du Système solaire, même en faibles quantités. Sur la planète Mars, par exemple, on a observé des traces de ruissellements comparables aux réseaux de fleuves que nous connaissons chez nous. Titan, satellite de Saturne, et Europe et Ganymède, satellites de Jupiter, présentent des surfaces de glace qui recouvrent des nappes d'eau vraisemblablement salée, mais, pour l'instant, on n'y a retrouvé aucune molécule organique. Si c'était le cas, il faudrait sûrement élargir notre notion de ce qu'est la vie. Car dans ta question, le terme le plus compliqué à définir, ce n'est pas l'eau (dont nous connaissons bien la composition physique, H2O, soit deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène), c'est la vie. Que l'eau soit un élément essentiel à l'apparition de la vie telle que nous la connaissons sur Terre est une hypothèse très fortement vraisemblable mais nous ne pouvons

pas dire, en sciences, qu'il s'agit d'une certitude absolue. L'origine de la vie reste la plus grande et la plus profonde question de la science. On a étudié, par exemple, des organismes qu'on appelle « extrémophiles », qui sont capables de se développer dans des milieux extrêmes (comme leur nom l'indique!), sans eau, sans lumière, sans oxygène même. On connaît des bactéries qui ont survécu sous des couches de sédiments épaisses d'un kilomètre au fond des océans, à des températures très élevées (environ 350 °C), ou bien encore ce virus de la « mosaïque du tabac » qui est actif en solution mais devient de la matière inerte quand on le cristallise. Alors, où est la frontière entre la vie et la mort? C'est nous qui la plaçons, mais peut-être que, dans la nature, la vie est un processus continu, avec différents états dont nous n'avons pas idée et qui reste encore à découvrir.

Mais du moins, on sait que l'eau était sur Terre avant l'apparition de la vie. Si je comprends bien, on peut juste en déduire qu'elle y est pour quelque chose.

Le problème est que les premiers organismes vivants sur Terre n'ont pas laissé de traces. Les plus anciennes traces du vivant, ce sont certains fossiles qui ont constitué des roches et qui datent d'il y a 3,5 milliards d'années (donc environ 1 milliard d'années après l'arrivée de l'eau). On a peine à croire que, d'un seul coup, ces organismes formés de colonies de bactéries soient apparus sans qu'il y ait eu avant d'autres

organismes vivants. Ou peut-être existe-t-il certaines traces que nous ne saurions qualifier de « vivantes », avec nos critères actuels, et que nous ne pouvons donc identifier? Tu vois, il reste encore tant et tant de choses à découvrir sur le mystère de la vie!

Ce que je trouve fascinant c'est la diversité incroyable des organismes vivants. Comment en est-on arrivés là?

Comme tu l'as compris, si l'eau est à l'origine de la vie, il est naturel que la mer soit restée un réservoir privilégié d'organismes vivants. On y trouve, aujourd'hui encore, toutes sortes d'animaux et de végétaux, du plus simple au plus complexe : des bactéries, êtres très primitifs, unicellulaires sans noyau, jusqu'à des mammifères très évolués, comme les cétacés. Si tout a commencé dans la mer, les organismes végétaux ont très tôt, avant 500 millions d'années, migré vers les terres émergées. Les animaux ont suivi il v a environ 360 millions d'années. Ils s'y sont adaptés et cela a permis un développement spectaculaire des espèces. Mais tous ces organismes terrestres sont restés dépendants de l'eau. On peut dire qu'en prenant pied sur la terre ferme, ils ont « emporté l'eau » avec eux. Notre corps, par exemple, contient environ 65 % d'eau. Les plantes terrestres en contiennent de 75 % à 95 %. Il reste bien en nous des traces de notre origine marine, comme le fait que nous naissions dans un liquide où nous vivons pendant neuf mois avant de voir le jour et de respirer. Nous sommes pratiquement des annexes de la mer!

Est-ce que ça veut dire que nous restons liés aux organismes qui peuplent la mer?

Oui, et même dépendants d'eux. Pas seulement parce qu'ils nous offrent des ressources intéressantes, mais surtout parce que les organismes marins participent directement au fonctionnement de notre environnement. Je pense principalement aux organismes du plancton qui régulent le climat en maintenant un équilibre entre le gaz carbonique et l'oxygène dans l'atmosphère et rendent ainsi notre planète terrestre habitable. De la bactérie aux poissons, jusqu'aux baleines, en passant par toute une série d'organismes et d'écosystèmes complexes, il y a là un ensemble vivant qui nous protège et que nous devons donc protéger aussi. Nous allons sûrement en reparler plus tard.

Oui, j'y compte bien! Pour l'instant, je reviens aux autres planètes: peut-on trouver de l'eau hors du Système solaire? Et de la vie?

Ce n'est pas impossible. C'est peut-être ce que l'on découvrira un jour sur les exoplanètes. On en a déjà identifié presqu'un millier, qui gravitent autour d'autres étoiles que notre Soleil, et il est très possible que l'on trouve de l'eau liquide sur certaines d'entre elles. Imagine que l'on décèle de l'oxygène gazeux dans leurs atmosphères : ce serait une bonne raison de

penser qu'il y a de la vie là-bas car cet oxygène moléculaire ne se trouve pour l'instant que sur la Terre et nous savons qu'il est produit par la vie. Trouver de l'oxygène sur une autre planète révolutionnerait toute la biologie!

Ce serait passionnant d'être l'explorateur des exoplanètes! Mais en attendant de trouver mieux, est-ce que nous pouvons nous mettre d'accord pour dire que la Terre est la seule planète du Système solaire à contenir une si grande quantité d'eau?

Là, nous sommes d'accord. Et je vais même t'expliquer ce qui fait de la Terre l'hôtesse idéale pour notre bonne H₂O! Elle est à une distance du Soleil telle que la température à sa surface se maintient à des valeurs compatibles avec la présence d'eau liquide. Et, autre qualité, certains gaz présents dans notre atmosphère assurent un « effet de serre » qui régule la température moyenne. Sans cet « effet de serre », la température serait de – 18 °C au lieu des 15 °C que nous connaissons aujourd'hui et l'eau ne se trouverait qu'à l'état de glace.

Mais, il faut aussi relativiser la quantité d'eau sur Terre. Car si les océans couvrent 71 % de sa surface, ils sont profonds en moyenne de 3,5 à 3,8 kilomètres avec quelques fosses extrêmes à 11 kilomètres. Cela n'est rien par rapport au rayon de la Terre qui est d'environ 6 370 kilomètres. Si donc tu regardes la planète tout entière, comme une boule compacte de matière et non la surface d'une sphère, la

masse d'eau représente moins d'un millième de la masse totale de la Terre... Cette immensité bleue, qui nous est si nécessaire, n'est donc pas infinie et reste fragile.

Bleue et salée

Tu parles d'immensité bleue. C'est vrai, moi aussi quand je pense à la mer, je la vois bleue et comme tous les enfants j'imagine, je la coloriais en bleu sur mes dessins. Là, regarde, il fait beau aujourd'hui et la mer est bleue comme le ciel alors qu'il arrive qu'ici, en Bretagne, où il y a souvent beaucoup de nuages gris, elle soit presque brune. Est-ce parce que le ciel est bleu que la mer est bleue?

Non, ce n'est pas parce que le ciel est bleu. Si tu remplis un verre d'eau de mer, que tu la puises dans le Pacifique sous un soleil de plomb ou dans la Manche un jour de pluie, ton eau est aussi transparente que ton verre. Tu auras beau l'exposer sous un ciel bleu, elle restera incolore. En revanche, si tu remplis avec ma piscine, dont le fond et les bords sont pourtant en carrelage blanc, elle deviendra bleue. Même chose pour un lac dans une grotte, où le ciel n'est pas visible. Cela veut dire que dès que l'on regarde une certaine quantité d'eau, que ce soit de l'eau douce ou de l'eau de mer, elle paraît bleue. Le Saint-Laurent au Québec, qui est un fleuve très large, est bleu lui aussi, comme

la mer. Pourquoi? Cela vient de l'interaction entre la lumière et l'eau. Comme tu le sais, la lumière du Soleil contient les couleurs de l'arc-en-ciel, rouge, jaune, bleu. Les molécules d'eau absorbent les rayons rouges et jaunes et ne renvoient que les bleus. Malgré cela, en effet, si le ciel est gris, si la lumière du soleil est moins vive, la mer devient sombre, grise ou brune. Et si elle transporte certaines algues, qui contiennent beaucoup de chlorophylle qui absorbe davantage la composante bleue des rayons solaires, elle peut prendre toutes les nuances de vert, jusqu'au turquoise dans les lagons du Pacifique ou des Bahamas. Au contraire, lorsqu'il n'y a presque pas de plancton, comme dans certains « déserts marins » en plein milieu du Pacifique, la mer est alors d'un bleu absolu, profond, un bleu pur que tu ne verras jamais même en Méditerranée.

Et pourquoi la mer est-elle salée? C'est encore un coup des comètes?

Pas du tout : les étoiles, les comètes ou la Lune n'y sont cette fois pour rien! Le sel vient des continents, transporté par les fleuves. Ceux-ci lessivent les affleurements de roches et arrachent petit à petit des molécules, en particulier du chlorure de sodium (le sel) ou de potassium, qu'ils charrient jusqu'à leur estuaire et le sel se concentre dans la mer.

Mais on pourrait penser qu'il se recycle...

Oui, c'est le cas, mais la partie qui se recycle

est très faible par rapport à la masse salée qui se trouve dans la mer. Donc sa salinité reste presque constante. Je suis persuadé qu'il y a 1 milliard d'années, la mer avait globalement à peu près le même taux de sel qu'aujourd'hui.

Je ne comprends pas : comment se fait-il alors que la Méditerranée soit beaucoup plus salée que l'Atlantique?

Ce dont je parle, c'est de la salinité globale à l'échelle de la mer « mondiale ». Mais tu as raison : on observe de grandes variations de salinité à la surface du globe. La différence se joue sur l'évaporation, donc l'intensité des rayons solaires. La mer Morte, qui est une mer fermée, de taille réduite et sous un climat très chaud, est un cas extrême puisque sa salinité est telle qu'on y flotte beaucoup mieux que dans la Méditerranée, par exemple. Les plus grandes salinités se trouvent aussi dans les marais salants (la Camargue, Guérande...). Depuis très longtemps, l'homme a exploité le sel. Chez les Égyptiens, puis les Romains, le sel avait même une grande valeur - on en avait besoin notamment pour la conservation des aliments. C'était un produit de luxe et un commerce très lucratif... pas autant que, bien plus tard, l'est devenu celui du pétrole, lui aussi salé d'ailleurs, parce que souvent formé en milieu marin. Mais continuons de regarder la mer : que vois-tu encore?

Les marées, la Lune et le Soleil

Je vois de l'eau qui bouge, bien plus que celle des fleuves... Je me laisse bercer par ce mouvement et, c'est bizarre, il est à la fois régulier, comme les vagues, les marées, et irrégulier : d'un jour à l'autre, parfois d'une heure à l'autre, la mer est différente, elle était calme, elle devient houleuse, puis déchaînée. Elle me semble imprévisible...

Là, tu touches un élément essentiel : la mer est un milieu instable, à un point d'ailleurs que tu es loin d'imaginer encore (mais n'anticipons pas!). Les fleuves aussi bougent, mais on comprend immédiatement comment et pourquoi : le plus souvent, ils naissent à une source qui jaillit de la terre, ils reçoivent en plus l'eau qui résulte de la fonte des glaciers en altitude et des précipitations, ils ruissellent puis creusent leur lit dans le sens d'une pente qui les mène vers la mer. Le courant global d'un fleuve, même si certains sont également sujets à des multiples irrégularités, fait courir l'eau toujours dans le même sens, de l'amont vers l'aval. En revanche, la mer bouge à cause de facteurs multiples, bien qu'en elle-même elle soit inerte. Il arrive d'ailleurs, tu l'as sans doute remarqué en naviguant, que l'on se trouve parfois sur une mer d'huile, plate, sans vagues ni courants... eh bien, même dans ce cas, tu vois quelques ondes, de minuscules vaguelettes, ou de la houle venue du grand large. La mer est un milieu liquide réactif, elle n'engendre pas elle-même ses mouvements. Et la cause de ses mouvements peut parfois se situer très loin du point où tu les observes : par exemple, la houle du grand large que je viens d'évoquer peut provenir de coups de vent qui soufflent à des centaines de kilomètres derrière l'horizon. Donc, tu as raison, certains mouvements de la mer sont très prévisibles, ou du moins réguliers : les marées, les courants, les vagues, qui sont des phénomènes généraux, cycliques et rythmés ; d'autres, en effet, sont accidentels...

Commence alors par m'expliquer les marées. Pour moi, c'est le mouvement le plus régulier. À la maison, nous avons le calendrier avec les horaires et les amplitudes des marées : c'est aussi précis que des horaires de trains! J'ai entendu dire que les marées sont provoquées par la Lune. Peux-tu m'en dire plus?

C'est exact, mais incomplet : les marées témoignent du grand phénomène de la gravitation des planètes. Sur Terre, elles proviennent en effet de l'attraction de la Lune mais aussi du Soleil, tu vas voir! Commençons par la Lune. Comme tu le sais, c'est un satellite de la Terre, elle met vingt-sept jours à en faire le tour, tandis que la Terre tourne sur elle-même en vingt-quatre heures. Comme tu l'as aussi appris, la force de gravité s'exerce sur toute matière : on parle de l'« attraction universelle ». Donc, par cette force d'attraction, la Lune soulève

les portions de croûte terrestre qui passent à sa portée : sur l'océan, on l'observe très nettement avec des élévations de plusieurs mètres, mais, avec des instruments ultrasensibles on peut détecter aussi les mouvements imperceptibles qui affectent les continents au passage de la Lune. Ce mouvement est ce qu'on appelle une marée.

Pourquoi alors y en a-t-il deux par jour alors que la Lune ne passe qu'une seule fois par jour au-dessus d'un point donné, par exemple, ici sur cette côte bretonne?

Très bonne question dont on a mis du temps à trouver la solution. Elle est venue encore de Newton, qui a non seulement identifié l'existence de la gravité mais aussi les lois de son fonctionnement. Ainsi, tu sais que, plus les masses qui s'attirent s'éloignent l'une de l'autre, moins la force de gravité est grande. La Lune attire plus fortement la région de la surface terrestre qui se trouve le plus directement sous elle : cela explique une marée par jour. Alors pourquoi deux marées? Comme l'attraction lunaire est plus forte sur le côté proche de la Lune que sur le centre de la Terre, et moins forte sur le côté opposé, cela provoque un étirement de chaque côté. La Terre est donc légèrement déformée, avec deux légers bourrelets symétriques à sa surface, un peu comme un ballon de rugby. Ainsi, pendant la rotation diurne, chaque point de la surface terrestre voit la mer se soulever deux fois. C'est pourquoi nous avons deux marées par jour d'amplitudes comparables.

La force de gravité devrait s'exercer dans les deux sens : l'attraction terrestre provoque-t-elle des sortes de marées sur la Lune?

Bien vu! Et, figure-toi que c'est le cas : la Lune s'étire sous l'effet de la Terre de même que la Terre se déforme par l'attraction de la Lune. D'ailleurs, progressivement, cette force qui a déformé légèrement la Lune a aussi ralenti son mouvement et elle s'est éloignée de la Terre, laquelle a également ralenti sa rotation : au temps des dinosaures, la Terre faisait un tour sur elle-même en dix-sept heures, contre vingt-quatre heures aujourd'hui. Et le jour terrestre continue d'augmenter à mesure que la surface de la Lune visible depuis la Terre diminue. Tu vois, l'Univers n'arrête pas de bouger!

Tu disais que le Soleil avait lui aussi un rôle dans les marées. Comment?

Toujours par le même processus : le Soleil exerce une force d'attraction sur la Terre. Même s'il est beaucoup plus gros que la Lune, il est aussi bien plus éloigné de la Terre, donc cette attraction est beaucoup moins forte. Néanmoins, elle explique les différences d'amplitude des marées. Comme tu le sais, ce qu'on appelle les « grandes marées », ont lieu, du moins sous nos latitudes, au moment des équinoxes, en mars et en septembre, c'est-à-dire quand le jour et la nuit sont de durée équivalente, c'est-à-dire

encore quand le Soleil et la Lune sont dans le même axe, donc leurs deux forces de gravité se cumulent pour tirer plus fort, et soulever davantage la mer. En revanche, aux solstices, la Lune et le Soleil sont sur des axes à angle droit l'un de l'autre et ils tirent à hue et à dia, provoquant donc des marées moins importantes.

Cet effet de marée se retrouve dans l'ensemble du Système solaire. Nous savons par exemple que, si tous les 100 000 ans environ, se produit une ère glaciaire, cela est dû aux effets de marée conjugués entre la Terre, la Lune, le Soleil mais aussi Jupiter et Saturne. Tout le monde s'y met! Retiens alors une chose : la Terre est une sphère et elle tourne ; ces deux éléments déterminent la totalité des autres phénomènes physiques.

Pourquoi certaines mers, la Méditerranée par exemple, n'ont-elles pas de marées?

Parce que les marées s'amplifient par résonance. Prenons une comparaison : si tu pousses ta petite sœur sur une balançoire, tu vas d'abord donner une première impulsion, qui va faire bouger un peu la balançoire. Ensuite, il suffit que tu continues de donner des poussées équivalentes à un rythme constant et la balançoire va prendre petit à petit une très grande amplitude. C'est ce qui se passe avec les marées. En soi, ce sont des poussées très faibles mais leur accumulation sur un espace très grand finit par avoir des effets importants. En réalité, il y a des

marées en Méditerranée mais, comme l'espace et le volume d'eau sont petits (par rapport à l'immensité de l'océan), leurs effets sont très peu perceptibles. La Méditerranée est un petit lac!

Des vagues de trente mètres

Les vagues aussi sont dues à l'attraction lunaire? Non, même si tu as l'impression que ce sont elles qui font progresser les marées, elles ne doivent rien à la Lune : elles sont engendrées par le vent.

C'est pour cela qu'elles changent tout le temps? Sur la côte ici en Bretagne, j'en ai vu de vraiment impressionnantes. Quelle hauteur peuvent-elles atteindre?

C'est un sujet de débat car nous avons peu d'observations fiables, les marins ayant tendance à exagérer leurs récits. Mais il faut reconnaître qu'il est difficile d'en estimer la hauteur à partir d'un bateau lui-même secoué par la tempête. Normalement, il devrait y avoir une relation directe entre la force du vent et la hauteur des vagues, mais c'est loin d'être le cas. Les plus hautes que j'ai pu moi-même observer lors de mes nombreuses navigations ne dépassaient pas huit à dix mètres de hauteur, ce qui est déjà très impressionnant, mais elles ne devenaient pas plus hautes par très grosse tempête avec des vents de plus de soixante nœuds marins (plus

de 120 km/h), comme s'il existait un effet de seuil. Mais on sait, par le témoignage d'accidents ou de naufrages, qu'il existe des vagues, très rares, qui s'élèvent brusquement jusqu'à plus de trente mètres. On les appelle les « vagues scélérates », on connaît le phénomène, on a plusieurs hypothèses pour l'expliquer mais pour l'instant, aucune n'est totalement convaincante.

Ce sont comme des tsunamis?

Non, pas du tout justement. Les tsunamis sont certes « scélérats » aussi – du moins monstrueux - mais ce sont des mouvements accidentels qui n'ont rien à voir avec les vents. Les tsunamis proviennent du fond de la mer : ils sont dus à des tremblements de terre sousmarins, parfois très loin de la côte où déferle la vague monstrueuse, comme celle qui a, par exemple, ravagé les côtes d'Indonésie et du Japon ces dernières années. Le terrain du fond marin se déplace de quelques mètres de niveau seulement mais sur plusieurs kilomètres de longueur. Cette petite rupture va faire bouger une masse d'eau considérable qui se propage en onde dans toutes les directions sans s'amortir. En surface, cette onde peut garder une hauteur limitée, de quelques dizaines de centimètres, mais, sa longueur atteignant plusieurs kilomètres, la masse d'eau mise en mouvement est considérable. Lorsque cette vague s'approche de la côte, elle garde toute son énergie (la même énergie qui a provoqué le léger mouvement

de terrain à l'origine) et se renforce par frottement sur des fonds moins profonds jusqu'à atteindre une dizaine de mètres de hauteur. Elle peut donc faire des dégâts énormes. Il est difficile d'imaginer, quand on voit les images de ces murs d'eau qui s'abattent sur les côtes, que, contrairement aux vagues scélérates qui se produisent en haute mer, le tsunami ne soit guère perceptible par les marins le croisant au grand large. Là, on ne sent pratiquement rien!

Les courants : cœur, artères, poumons

Cela donne un peu le mal de mer d'imaginer que tout bouge tout le temps, même quand on ne le voit pas : à cause du vent, de la Lune, du Soleil, et même de la Terre...

Eh oui, je te l'ai dit : la mer est un milieu instable! Mais tu comprends au passage que, pour connaître ses mouvements, il ne faut pas se fier qu'au visible. Les courants marins, par exemple, que tu ne vois pas d'ici, sont des phénomènes d'une ampleur beaucoup plus importante que les marées, avec des effets bien plus décisifs sur notre vie puisqu'ils sont directement responsables des variations climatiques.

J'imagine, sans trop savoir, que c'est surtout le vent qui provoque les courants. J'ai raison?

Tu as raison... en surface. Pour t'expliquer, je te propose d'abord une autre image :

représente-toi la circulation des courants marins dans l'océan comme la circulation sanguine dans notre corps. Ton sang est envoyé par une pompe, le cœur, dans tous les organes. Il transporte de l'énergie, des éléments dissous, des particules. Il va ensuite recharger en oxygène tes poumons et remonter au cœur. Et le circuit se poursuit en permanence. Dans l'océan, les artères principales sont les courants profonds qui répartissent les eaux dans l'ensemble des grands fonds, dans tous les bassins, puis la circulation veineuse et pulmonaire prend le relais en ramenant les masses d'eaux par les courants de surface jusqu'à la pompe principale qui se trouve en mer de Norvège. Le tout ressemble à un immense tapis roulant.

Combien de temps faut-il pour faire le tour complet ?

Entre mille cinq cents et deux mille ans.

C'est long! Rien à voir avec mon sang, qui fait le tour complet en un battement de cœur.

La comparaison s'arrête là en effet! Il faut nous mettre au rythme géologique. À cette échelle, ces deux mille ans représentent un moment assez bref pour pouvoir observer le rôle de l'océan dans la régulation du climat global; et c'est aussi un temps assez long qui explique que les climats évoluent lentement. C'est du court lent, si tu veux!

Mouais... je vois à peu près : hyperlong pour

une vie humaine, hypercourt pour la planète. Et le vent dans tout ça?

Le vent joue un peu le rôle des veines, si je reprends ma comparaison avec le corps humain. Ce sont des vents réguliers qui forment les courants de surface capables tout de même d'entraîner des masses d'eau de quelques dizaines à quelques centaines de mètres d'épaisseur sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.

Quand tu dis que ces vents sont « réguliers », cela veut dire qu'on sait d'où ils proviennent?

Là, on retrouve notre Soleil : c'est lui qui nous envoie l'énergie qui réchauffe les températures. La température est un autre élément essentiel à retenir pour comprendre la mer. Tu sais que, comme la Terre est une sphère, il fait chaud aux basses latitudes, plus tu t'approches de l'équateur, et froid aux hautes latitudes, plus tu montes vers les régions polaires, parce que les rayons du soleil arrivent presque verticalement sur l'équateur et de façon oblique aux pôles. L'air chaud des zones équatoriales est peu dense et s'élève dans les hautes couches de l'atmosphère, où il se refroidit et il redescend alors vers les latitudes moyennes, dans l'hémisphère nord. Cela engendre une vaste zone de hautes pressions que l'on appelle « anticyclone ».

Comme le fameux « anticyclone des Açores » dont on nous parle souvent dans la présentation de la météo à la télé?

Oui, c'est bien de lui qu'il s'agit.

Le grand tourbillon des vents

Là, il n'est pas vraiment question de vents, encore moins de courants marins?

Mais si, tout est lié. Un anticyclone est toujours entouré d'une sorte de grand tourbillon de vents qui entraînent des courants marins et qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord, et dans le sens inverse dans l'hémisphère Sud. Cette rotation des vents et des courants est le résultat de ce qu'on appelle la force de Coriolis, dont tu as sûrement aussi entendu parler.

Euh, rappelle-moi ce que c'est... genre révision de géo!

Coriolis est un ingénieur français du XIX^e siècle. Il a identifié ce phénomène qui affecte tous les mouvements des masses d'eau et des masses d'air à la surface de la Terre. Tu te souviens : la Terre est ronde et elle tourne sur elle-même d'ouest en est. Et nous voilà devant une des conséquences de cet état de fait fondamental. Si tu fais tourner une sphère sur un axe, la vitesse de rotation sera presque nulle aux pôles et très rapide au milieu de la sphère. Du coup, une goutte d'eau ou un souffle d'air chaud qui partent de l'équateur avec une vitesse rapide pour aller vers les pôles plus froids perdent en chemin leur vitesse et sont donc déviés, vers la droite dans l'hémisphère Nord,

vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Cette déviation est nulle à l'équateur, s'accentue aux latitudes moyennes (où nous retrouvons notre anticyclone des Açores), et est à son maximum aux pôles.

Gardons l'exemple de l'anticyclone des Açores (mais il y a le même phénomène dans l'hémisphère Sud). Il s'accompagne d'un immense réseau de courants, dont le Gulf Stream est un des éléments les plus visibles, mais il n'est pas le seul. C'est un courant relativement chaud lorsqu'il naît dans le golfe (d'où son nom) du Mexique. Il remonte ensuite vers le nord en passant entre les Bahamas et la Floride puis longe la côte américaine en se refroidissant peu à peu. Après avoir traversé l'Atlantique, il est dévié en deux branches, l'une d'elle va vers l'Europe, l'autre vers les zones arctiques où les eaux se refroidissent considérablement. Tu vois, c'est un sacré trajet!

Et il modifie les températures des régions qu'il traverse, je suppose?

Exactement. Cela explique que, dans l'Atlantique aux latitudes moyennes, la rive européenne, où nous sommes, soit globalement plus tempérée que la rive américaine, puisqu'elle bénéficie davantage des vents et courants chauds venus des tropiques. Note qu'entrent aussi en jeu une multitude d'autres facteurs, notamment d'autres vents (par exemple, les alizés qui soufflent d'est en ouest, ou les jet streams,

des vents de haute altitude puissants qui eux, soufflent d'ouest en est et jouent un rôle capital dans la dispersion de la chaleur à la surface du globe). Mais restons-en au mouvement général.

Si je comprends bien : les masses d'air, les hautes et basses pressions dans l'atmosphère, les vents, les courants océaniques, tout cela tourne dans le même sens...

Tu comprends bien! Les courants océaniques suivent assez fidèlement le schéma de la circulation atmosphérique. Globalement, vents et courants ont le même rôle: transporter l'énergie thermique depuis les tropiques jusqu'aux pôles. Mais leur différence essentielle est que l'eau déplace beaucoup plus de chaleur que l'air (4 000 fois plus à volume égal) et que, comme une masse d'eau a une grande force d'inertie, les courants sont bien plus réguliers que les vents. Une fois démarrés, ils sont difficiles à arrêter. Les vents servent essentiellement à entretenir le mouvement.

Si ces vents s'arrêtent ou diminuent, cela va-t-il tout de même ralentir la circulation de l'eau?

La configuration générale des courants n'en sera pas perturbée, cela peut, en revanche, engendrer des modifications temporaires de la circulation.

Et c'est grave?

Parfois, oui, car le climat en est sérieusement bouleversé, mais sur une courte durée. C'est le cas, par exemple, du phénomène El Niño. J'en ai entendu parler mais je n'ai jamais bien compris de quoi il s'agissait exactement...

On a observé depuis très longtemps qu'au large du Pérou se produisait, certaines années, un changement majeur dans la circulation océanique. En temps normal, les côtes péruviennes sont baignées d'eaux froides en provenance des hautes latitudes, nord et sud. Ces eaux convergent dans la zone équatoriale où elles se réchauffent peu à peu. Elles sont alors poussées vers l'ouest par les alizés et, s'éloignant des côtes, laissent derrière elles des remontées d'eaux profondes (ce qu'on appelle des « upwelling »), froides et riches en éléments nutritifs, qui favorisent la fécondité des populations de poissons, pour le bonheur des pêcheurs péruviens.

Mais de temps en temps, avec une fréquence de trois à cinq ans environ, ce système s'arrête. Les alizés faiblissent de façon drastique et les eaux chaudes de surface ne fuient plus vers l'ouest. Elles s'accumulent le long des côtes péruviennes, bloquant la remontée des eaux profondes. La pêche s'appauvrit très vite, et les pêcheurs aussi... Ce phénomène se produit en général aux environs de Noël, d'où le nom de « El Niño », pour le Niño Dios, l'enfant Jésus, que lui ont donné les Péruviens. Pour marquer la différence, on a appelé les périodes dites normales « La Niña ».

El Niño a des conséquences qui dépassent très largement les côtes de l'Amérique du Sud.

La suspension du flux des eaux équatoriales vers l'Asie du Sud-Est provoque dans ces régions des sécheresses intenses, accompagnées d'incendies de forêt catastrophiques. Des cyclones d'amplitude inhabituelle se forment au milieu du Pacifique tandis que, sur les côtes américaines, l'évaporation augmente et s'abattent des pluies diluviennes.

Les eaux des grands fonds

Tu n'as pas fini de m'expliquer le circuit des courants : tu parlais de « courants profonds » qui seraient un peu comme nos artères, reliées au cœur...

Merci de me le rappeler, heureusement que tu suis! Les courants profonds sont ceux qui permettent le trajet inverse, de la mer de Norvège vers l'équateur. C'est en mer de Norvège, le cœur de notre circuit de courants, que se forment ces eaux des grands fonds : l'eau relativement chaude en provenance du Sud se refroidit au contact des basses températures de la région. Mais ces températures atmosphériques ne sont pas assez basses pour empêcher une évaporation relativement importante, qui augmente la salinité de l'eau. Ces deux facteurs, refroidissement et salinité, contribuent à densifier ces eaux qui, donc, sont plus lourdes et plongent à grande profondeur. C'est ce qu'on appelle la circulation « thermo-haline » (« thermo » comme chaleur,