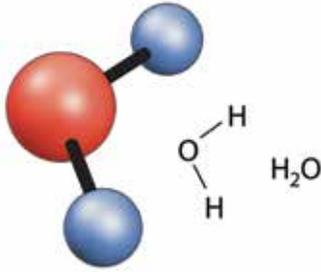


BESTIAIRE

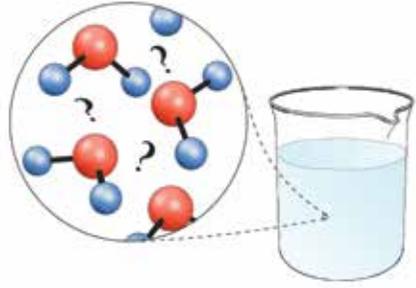
GUIDE TOURISTIQUE SUR LES ESPÈCES TAPIES DANS LES RECOINS DU MYSTÉRIEUX MONDE DE L'EAU.

MOLÉCULE D'EAU



La molécule d'eau familière, composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

EAU EN VRAC



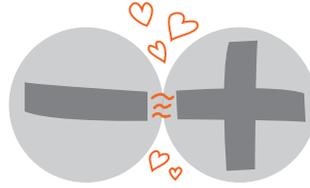
L'état standard des molécules d'eau en phase liquide, dont l'arrangement est encore en discussion.

ZONE D'EXCLUSION (ZE)



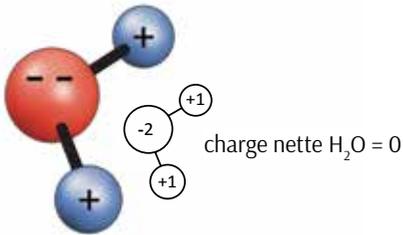
La « zone d'exclusion » (ZE), zone d'eau étonnamment large se formant au contact de nombreux matériaux immergés, doit son nom au fait qu'elle exclut pratiquement tout. La présence de ZE implique de la charge électrique, et son comportement diffère de celui de l'eau en vrac. On l'appelle parfois le quatrième état de l'eau.

ÉLECTRON ET PROTON



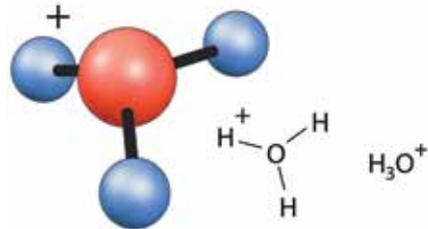
Particules élémentaires de charge identique et opposée (l'électron étant négatif et le proton, positif) ; ils s'attirent donc comme des aimants. Les électrons et les protons jouent un rôle central dans le comportement de l'eau, bien plus que vous ne pourriez le penser.

CHARGE DES MOLÉCULES D'EAU



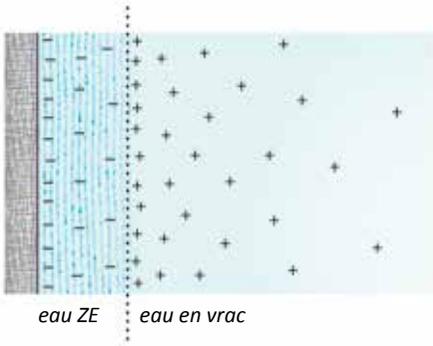
La molécule d'eau est neutre. Son oxygène porte deux charges négatives, tandis que ses deux atomes d'hydrogène portent chacun une charge positive.

ION HYDRONIUM



Un proton (c'est à dire, un atome d'hydrogène privé de son électron) s'accroche à une molécule d'eau pour former un ion hydronium. Imaginez une molécule d'eau chargée positivement : vous avez un ion hydronium. Les espèces chargées comme les ions hydronium sont très mobiles et peuvent faire beaucoup de ravages.

BATTERIE INTERFACIALE



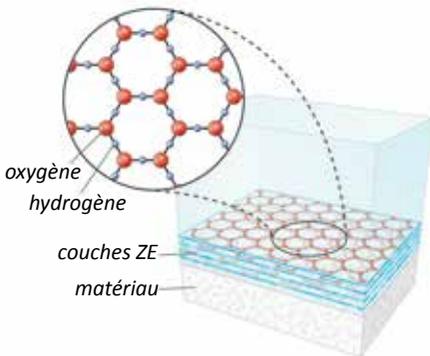
Cette batterie est formée de la zone d'exclusion et de la zone d'eau en vrac adjacente. Ces deux zones sont chargées de manière opposée, la séparation étant maintenue comme dans une batterie ordinaire.

ÉNERGIE RAYONNANTE



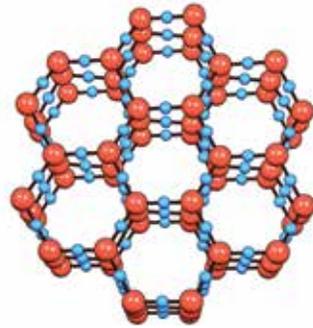
L'énergie rayonnante charge la batterie. Cette énergie provient du soleil et d'autres sources de rayonnement. L'eau l'absorbe, et cela charge la batterie.

COUCHE EN NID D'ABEILLE



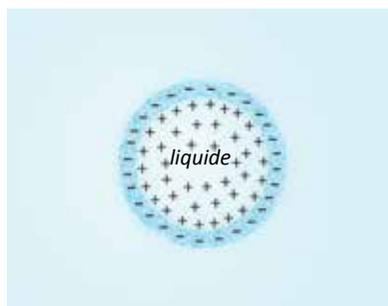
La couche en nid d'abeilles est la structure unitaire de la ZE. Les couches s'empilent parallèlement à la surface du matériau pour construire la ZE.

GLACE



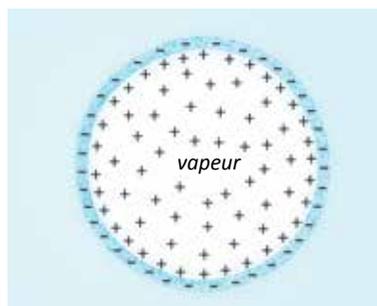
La structure atomique de la glace ressemble fortement à la structure atomique de la zone d'exclusion. Cette similitude est plus qu'une simple coïncidence, et on passe rapidement de l'une à l'autre.

GOUTTE



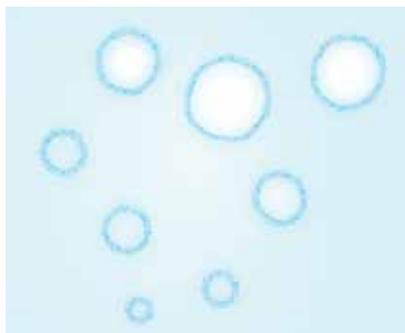
La goutte d'eau se compose d'une enveloppe de ZE qui entoure de l'eau en vrac. Ces deux composantes sont de charges électriques opposées.

BULLE

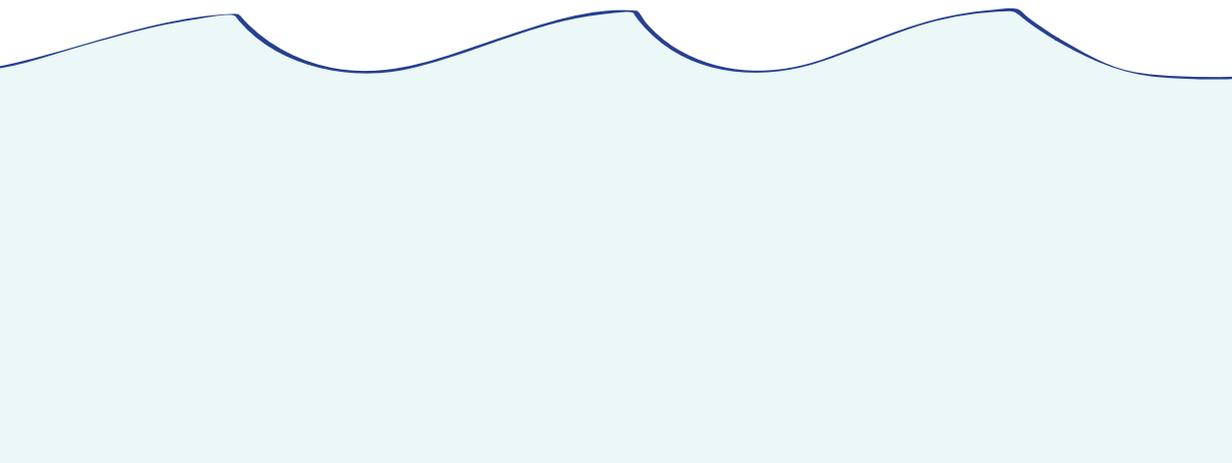


La bulle se structure comme une goutte à la différence qu'elle renferme un gaz à l'intérieur. Généralement, ce gaz est de la vapeur d'eau.

VÉSICULE

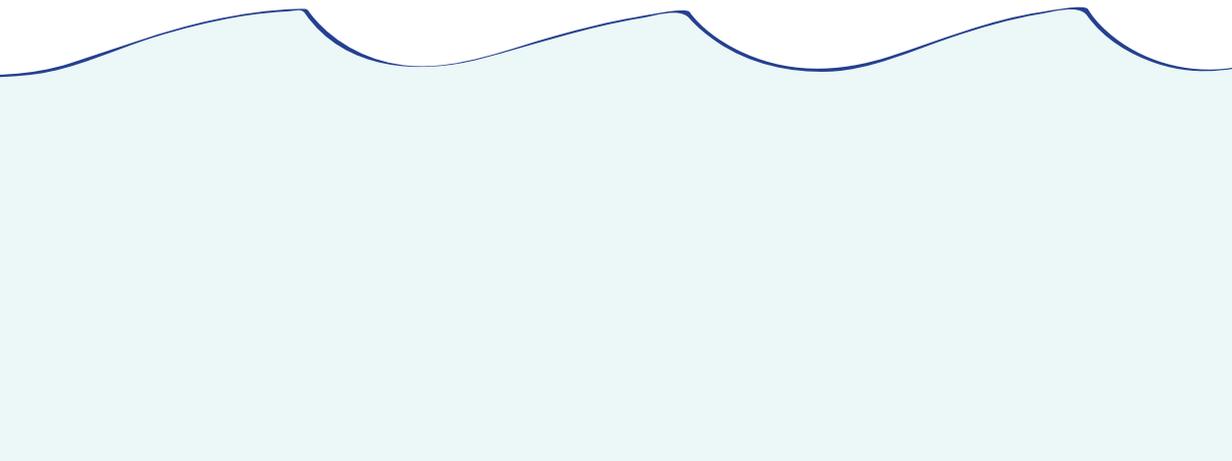


Étant donné que les gouttes et les bulles sont structurées sur le même modèle, nous introduisons le terme générique de vésicule. Une vésicule pourra désigner une goutte ou une bulle selon l'état de l'eau qui se trouve à l'intérieur. Il se peut qu'une goutte qui absorbe suffisamment d'énergie se transforme en bulle.



1^{ère} partie

Un pavé dans la mare :
présentation des faits





1 Les mystères nous entourent

Béchers en main, deux étudiants traversèrent précipitamment la salle pour me montrer quelque chose d'inattendu ; malheureusement, le résultat qu'ils venaient d'observer s'était évanoui avant même d'avoir pu y jeter un coup d'œil. Le phénomène réapparut le lendemain, et je compris pourquoi cette expérience avait suscité autant d'enthousiasme parmi mes étudiants : ils avaient été témoins d'un phénomène défiant toute explication au sujet de l'eau.

L'eau recouvre la plus grande partie de la planète. Elle est présente dans nos lieux. Elle remplit nos cellules dans une mesure bien supérieure à ce que vous pourriez penser. Le volume de vos cellules se compose au deux tiers d'eau ; toutefois, une molécule d'eau est si petite que, s'il vous prenait l'envie de compter chaque molécule de votre corps, 99% d'entre elles s'avèreraient être des molécules d'eau. Ce nombre de molécules d'eau est nécessaire pour remplir les deux tiers du volume de nos cellules. Vos pieds ne sont autre chose que deux gigantesques sacs renfermant principalement des molécules d'eau.

Que savons-nous au sujet de ces molécules d'eau ? Certes, les scientifiques les étudient, mais ils semblent peu se soucier des grands ensembles de molécules d'eau que l'on trouve dans les béchers. Au lieu de cela, la plupart des scientifiques préfèrent se focaliser sur une seule molécule et ses voisines immédiates, dans l'espoir de pouvoir extrapoler ce qu'ils observent aux phénomènes à plus grande échelle que nous connaissons. Tout le monde cherche à comprendre le comportement apparent de l'eau, c'est-à-dire comment ses molécules agissent « socialement ».

Mais comprenons-nous vraiment le comportement social de l'eau ?

Étant donné que l'eau est omniprésente, vous pourriez raisonnablement penser que nous la comprenons totalement ; je vous mets au défi de prouver cette idée reçue. Je vous livre ci-dessous une série d'observations quotidiennes ainsi que quelques expériences simples réalisées en laboratoire. Voyez si vous pouvez les expliquer. Si vous le pouvez, j'ai perdu : vous pouvez arrêter la lecture de ce livre. Mais si vos explications demeurent vagues même après avoir consulté les abondantes sources disponibles, je vous demanderai alors de bien vouloir reconsidérer l'idée selon laquelle nous savons tout ce qu'il y a à savoir au sujet de l'eau.

Je pense que tel n'est pas le cas. Voyons où nous en sommes.



Mystères de la vie quotidienne

Voici quinze observations que nous faisons quotidiennement. Êtes-vous en mesure de les expliquer ?

- **Sable mouillé et sable sec.** Lorsque l'on marche sur du sable sec, on s'enfonce profondément, mais difficilement dans celui humide qui borde une étendue d'eau. En vérité, ce sable est si ferme que l'on peut s'en servir pour construire de solides châteaux ou faire des sculptures. Il est évident que l'eau joue un rôle de colle. Mais comment l'eau agglomère-t-elle ces particules de sable ensemble ? (La réponse est révélée au Chapitre 8.)

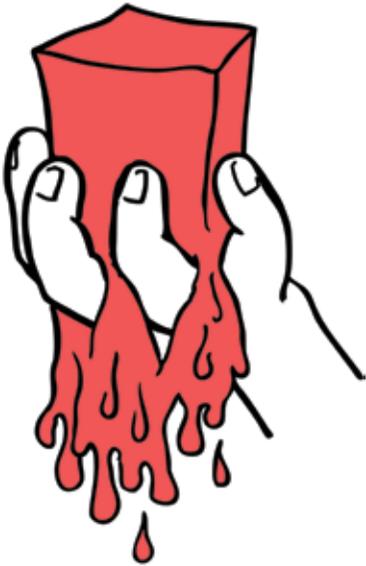


Fig. 1.1 Qu'est-ce qui empêche l'eau de couler depuis la gélatine ?

- **Vagues de l'océan.** Les vagues se dissipent généralement après avoir parcouru une distance relativement courte. Toutefois, les vagues de tsunami peuvent faire plusieurs fois le tour de la Terre avant de mourir. Pour quelles raisons persistent-elles sur de telles distances ? (Tenez jusqu'au chapitre 16.)

- **Gélatine.** Les desserts à base de gélatine se composent essentiellement d'eau. Avec toute cette eau à l'intérieur, on pourrait penser qu'ils couleraient (**Fig. 1.1**). Or, il n'en est rien. Même pour des gélatines contenant jusqu'à 99.95% d'eau¹, il n'y a pas d'écoulement. Comment se fait-il que de l'eau ne goutte pas ? (Solidifiez vos connaissances aux chapitres 4 et 11.)

- **Couches.** Tout comme les gélatines, les couches peuvent contenir une grande quantité d'eau : plus de 50 fois leur poids d'urine et 800 fois leur poids d'eau pure. Comment peuvent-elles contenir autant d'eau ? (Gonflez vos neurones au chapitre 11.)

• **Caractère glissant de la glace.** Les matières solides ne glissent généralement pas facilement l'une sur l'autre ; pensez à vos chaussures dans une rue pentue : la friction les empêche de glisser. Toutefois, si cette pente est verglacée, vous devrez faire très attention à ne pas tomber. Pourquoi la glace se comporte-t-elle si différemment de la plupart des autres solides ? (Glissez jusqu'au chapitre 12.)

• **Gonflement.** Votre amie se casse la cheville lors d'une partie de tennis ; sa cheville va enfler et doubler de volume en l'espace de quelques minutes. Pourquoi de l'eau arrive-t-elle si rapidement au niveau de la blessure ? (Le chapitre 11 propose une réponse.)

• **Geler de l'eau chaude.** Un collégien précoce fit un jour une curieuse observation en classe de cuisine : il remarqua qu'en versant de l'eau chaude sur de la crème glacée en poudre, il obtenait une friandise glacée plus rapidement qu'avec de l'eau froide. Cette observation paradoxale est aujourd'hui célèbre. Comment cette eau chaude peut-elle geler plus rapidement que de l'eau froide ? (Régalisez-vous au Chapitre 17.)

• **Élévation de l'eau.** Les feuilles ont soif. Pour remplacer l'eau perdue par évaporation dans les plantes et les arbres, l'eau monte des racines par de petites colonnes étroites. Généralement, on explique ce phénomène en disant que c'est le sommet de ces capillaires qui attire vers le haut l'eau qui se trouve plus bas. Mais cela devient problématique pour des arbres comme le séquoia atteignant une centaine de mètres de hauteur : le poids de l'eau amassée dans chaque capillaire suffirait à rompre la colonne. Une fois brisée, une colonne ne peut plus puiser de l'eau dans les racines. Comment la nature s'y prend-elle pour éviter une telle catastrophe ? (Étanchez votre soif de savoir grâce au chapitre 15.)

• **Casser du béton.** Il arrive que des trottoirs en béton se fissurent sous l'action de racines. Les racines des arbres se composent essentiellement d'eau. Comment est-il possible que des racines contenant de l'eau puissent exercer une pression suffisante pour briser des blocs de béton ? (Consultez le chapitre 12.)

• **Gouttes sur une surface.** Les gouttes d'eau vont perler sur certaines surfaces et s'étaler sur d'autres. Il se trouve que le degré d'étalement peut servir à classer différentes surfaces. Assigner une classification n'explique cependant pas pourquoi les gouttes s'étalent, ni jusqu'où elles s'étalent. Quelles forces font qu'une goutte d'eau va s'étaler ? (Rendez-vous au Chapitre 14.)

• **Marcher sur l'eau.** Peut-être avez-vous déjà vu des vidéos de lézards « Jésus-Christ » en train de marcher sur l'eau ; on remarque que ces lézards ne cessent de courir tout du long. On pensera à la grande tension de surface de l'eau comme explication possible, mais si cette tension de surface dérivait uniquement des molécules d'eau des couches supérieures, elle devrait être faible. Quelle est donc cette propriété de l'eau (ou du lézard) qui permet d'effectuer un tel déplacement



Fig. 1.2 Qu'est-ce qui dirige la vapeur qui s'élève des océans vers des endroits précis ?

— qui n'est pas sans rappeler un miracle biblique ? (Lisez le chapitre 16.)

- **Nuages isolés.** De la vapeur d'eau s'élève des immenses étendues ininterrompues des océans. Cette vapeur devrait être partout ; pourtant, des nuages blancs floconneux formeront souvent des entités séparées qui ponctueront un ciel par ailleurs bleu (**Fig. 1.2**). Quelle force dirige la vapeur qui s'élève de manière diffuse vers ces sites spécifiques ? (Les chapitres 8 et 13 abordent cette question.)

- **Articulations qui grincent.** Généralement, les profondes révérences ne provoquent pas de grincement, ceci parce que l'eau assure une excellente lubrification entre les os (en réalité, entre les couches de cartilage qui recouvrent les os.) Quelle est cette caractéristique de l'eau qui permet une si petite friction ? (Voyez le chapitre 12.)

- **Flottaison de la glace.** La plupart des substances se contractent en refroidissant. L'eau se contracte également, jusqu'à 4°C ; en-dessous de cette température critique, l'eau entre en expansion, et d'autant plus lorsqu'elle se transforme en glace. C'est la raison qui fait que la glace flotte. Qu'a donc de spécial cette température de 4°C, et pourquoi la glace est-elle à ce point moins dense que l'eau ? (Le chapitre 17 répond à ces questions.)

- **Consistance du yaourt.** Pour quelles raisons les yaourts restent-ils aussi fermes ? (Dévorez le chapitre 8.)

Mystères observés en laboratoire

Nous allons à présent nous pencher sur quelques simples observations de laboratoire, en commençant par celle qui a poussé mes étudiants à venir vers moi en courant pour me montrer ce qu'ils avaient découvert.

1) Le mystère des microbilles migratrices

Ces étudiants venaient d'effectuer une expérience simple. Ils avaient déversé une grande quantité de petites billes (que l'on nomme « microbilles ») dans un bécher rempli d'eau, agité le récipient pour s'assurer que le mélange se fasse correctement, couvert le bécher pour minimiser l'évaporation, avant de rentrer chez eux passer une bonne nuit de sommeil. Le lendemain matin, ils étaient revenus examiner le résultat.

Selon la pensée dominante, il n'aurait rien dû se produire de plus qu'un possible dépôt au fond du bécher. Les microbilles en suspension aurait dû donner une eau uniformément trouble, un peu comme si on avait versé quelques gouttes de lait dans de l'eau avant de secouer le tout vigoureusement.

L'eau semblait en effet uniformément trouble... dans sa plus grande partie, car au centre du bécher (en regardant par le dessus), on pouvait voir un cylindre d'eau claire inexplicable allant du sommet au fond du récipient (**Fig. 1.3**). La limpidité de ce cylindre signifiait que l'eau le composant était dépourvue de microbilles : une force mystérieuse avait écarté les microbilles en dehors d'une colonne centrale vers les bords du récipient. Si vous avez vu *2001, L'Odyssée de l'Espace* et l'étonnement des hommes-singes lorsqu'ils voient pour la première fois le monolithe aux lignes parfaites, vous pouvez vous faire une idée de la manière dont nos mâchoires se sont décrochées ; c'était vraiment quelque chose à voir.

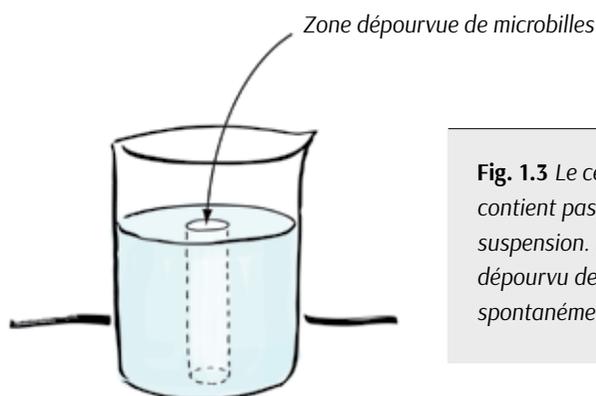


Fig. 1.3 Le centre du récipient ne contient pas de microbilles en suspension. Pourquoi ce cylindre dépourvu de microbilles est-il apparu spontanément ?

Ces cylindres sont apparus aussi longtemps que les conditions initiales sont restées dans une fenêtre bien définie, et nous avons pu en produire à volonté². Question : qu'est-ce qui provoque la migration contre-intuitive centrifuge de ces microbilles ? (Le chapitre 9 l'explique.)



Fig. 1.4 Le pont d'eau. Un pont fait d'eau couvre la distance qui sépare deux béchers remplis d'eau. Qu'est-ce qui soutient ce pont ?

2) Le pont d'eau

Le « pont d'eau » est un autre phénomène curieux obtenu en laboratoire par lequel on peut voir de l'eau relier deux béchers séparés l'un de l'autre. Bien que le pont d'eau soit une curiosité qui a aujourd'hui plus d'un siècle, Elmar Fuchs et ses collègues ont réalisé des travaux au retentissement mondial.

La démonstration débute en remplissant d'eau deux béchers pratiquement jusqu'en haut puis en les plaçant côte à côte, les bords en contact. Une électrode plongée dans chacun des béchers créera une différence de potentiel de l'ordre de 10 kV ; immédiatement, l'eau de l'un des béchers va sauter par-dessus son rebord pour rejoindre l'autre bécher. Une fois le pont formé, il est possible d'éloigner lentement les deux béchers ; le pont ne se rompra pas, il continuera à s'allonger et à couvrir la distance qui sépare les deux récipients même lorsque leurs bords seront éloignés de plusieurs centimètres (**Fig. 1.4**).

Étonnamment, le pont d'eau a du mal à s'affaisser et présente une solidité qui rappelle celle de la glace, même lorsque l'expérience a lieu à température ambiante.

Je vous conseille de résister à la tentation de reproduire cette expérience à haute tension sauf si vous pensez être immunisé contre les électrocutions ; il est plus sage de regarder une vidéo de ce phénomène époustoufflant.^{w1} Question : Comment tient ce pont fait uniquement d'eau ? (Voyez le chapitre 17.)

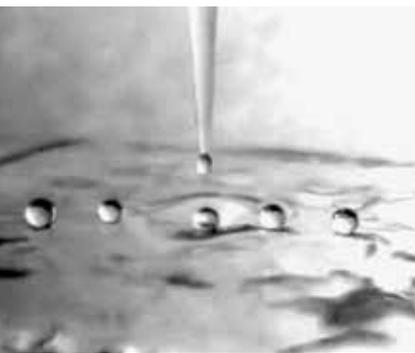


Fig. 1.5 Les gouttes d'eau persistent un certain temps à la surface de l'eau. Pourquoi ?

3) Ces gouttes d'eau qui flottent

L'eau devrait se mélanger instantanément avec de l'eau. Toutefois, si vous laissez tomber quelques gouttes d'eau d'un tube étroit positionné juste au-dessus d'une assiette remplie d'eau, il arrivera souvent que ces gouttes flottent quelque temps à la surface de cette eau avant de s'y dissoudre (**Fig. 1.5**). Parfois, ces gouttes peuvent subsister jusqu'à dix secondes. Encore plus paradoxalement, ces gouttes ne se dissolvent pas comme des événements unitaires

simples mais comme une succession de projections dans la flaque en-dessous³ ; leur dissolution ressemble à une danse programmée.

On peut voir dans la nature des gouttes d'eau flotter si vous savez où regarder. Le bon moment est juste après une averse, quand de l'eau goutte d'une avancée de toit dans une flaque, ou du rebord d'un bateau dans un lac. Même les gouttes de pluie flottent parfois lorsqu'elles entrent directement en contact avec de l'eau au sol. La question évidente est : puisque l'eau se mélange naturellement avec l'eau, quelle caractéristique fait que l'on peut observer un retard dans la coalescence naturelle ? (Lisez les chapitres 13 et 16.)

4) La décharge de Lord Kelvin

Enfin, la **Fig. 1.6** nous décrit une observation qui donne de quoi se gratter la tête. De l'eau provenant d'une bouteille renversée ou d'un robinet ordinaire est répartie entre deux tuyaux. Des gouttes tombent de chacun de ces tuyaux, passent à travers des anneaux en métal, puis retombent dans des récipients métalliques. Des fils électriques assurent une connexion croisée entre les anneaux et les récipients comme on peut le voir sur le dessin. Des sphères métalliques reliées aux récipients en métal se font face avec un vide de plusieurs millimètres entre elles.

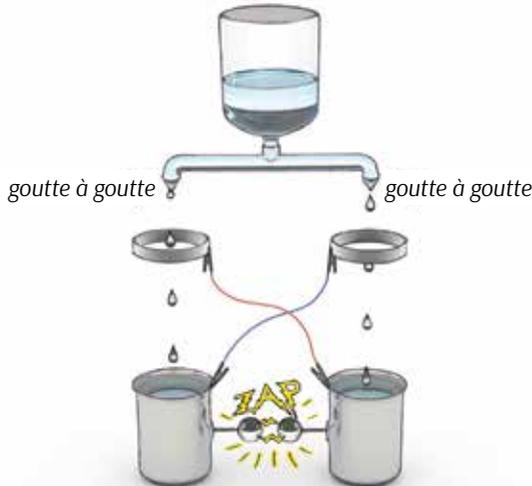


Fig. 1.6 Le générateur électrostatique de Kelvin. Le niveau de l'eau qui monte crée une décharge de haute tension. Pour quelles raisons ce phénomène se produit-il ?

Initialement conçue par Lord Kelvin, cette expérience produit un résultat surprenant. Une fois que suffisamment de gouttes sont tombées, on commence à entendre un crépitement, puis, peu après, on observe un flash de décharge dans le vide accompagné d'un craquement audible.

Une décharge électrique ne peut se produire que s'il y a une grande différence de potentiel électrique entre les deux récipients ; cette différence de potentiel peut aisément nécessiter 100 000 volts suivant la longueur du vide. Pourtant, le grand écart de charge électrique nécessaire pour créer cette différence de potentiel provient d'une unique source d'eau.

Il est possible de construire l'un de ces appareils exotiques à la maison^{w2} ; néanmoins, cela reste beaucoup plus simple de regarder la décharge obtenue en vidéo. Un bel exemple est celui du professeur Walter Lewin^{w3} qui effectue une démonstration devant une classe pleine d'étudiants de première année du MIT stupéfaits ; il invite ensuite ces étudiants à expliquer ce phénomène en guise de devoir à la maison. Pouvez-vous expliquer pourquoi une simple source d'eau peut provoquer un écart de charge si important ? (Lisez le chapitre 15.)

Leçons que l'on peut tirer de ces mystères

Les phénomènes présentés dans la présente partie rejettent toute explication simpliste. Même les éminents spécialistes de l'eau que je connais sont incapables de proposer des réponses satisfaisantes, la plupart d'entre eux n'allant pas au-delà des explications les plus superficielles. Il est évident qu'il manque quelque chose dans notre compréhension actuelle des choses, sans quoi ces phénomènes seraient facilement explicables ; or, il se trouve qu'ils ne le sont pas.

Je voudrais souligner une nouvelle fois que nous ne parlons pas de l'eau au niveau moléculaire, mais d'une grande quantité de molécules d'eau. Il ressort de tout cela que nous ne comprenons pas les interactions entre molécules d'eau, ce que l'on pourrait appeler le comportement « social » de l'eau.

Le comportement social est le domaine d'études des sociologues et des cliniciens. L'un de mes amis, qui est psychiatre, m'a dit un jour que pour comprendre le comportement humain, il fallait s'intéresser aux excentriques et aux gens bizarres ; mon ami était d'avis que leurs expériences extrêmes nous livraient des clés pour mieux comprendre les comportements plus subtils du reste de la population. Le même raisonnement peut s'appliquer ici : les exemples que nous avons vus décrivent des situations où l'eau montre des comportements « sociaux » extrêmes ; par conséquent, ils fournissent des indices pour mieux comprendre les comportements plus ordinaires des molécules d'eau.

Ainsi, plutôt que de nier notre incapacité à expliquer les phénomènes présentés, analysons-les pour révéler les clés qu'ils renferment. Tournons notre ignorance à notre avantage. Vous verrez où cette nouvelle façon de penser nous conduira lorsque nous atteindrons le milieu de ce livre.

Le prochain chapitre se révélera particulièrement utile : il revient sur ce que nous connaissons déjà sur le comportement social de l'eau tout en se penchant sur ce que nous ne savons pas, mais il expose surtout les raisons surprenantes qui font que nous en savons si peu sur la substance la plus abondante sur Terre.