



BIBLIOGRAPHIE

G. Buti, **Colère de Dieu, mémoire des hommes. La peste en Provence 1720-2020**, Cerf, 2020.

J.-C. Sournia, **La Médecine révolutionnaire (1789-1799)**, Payot, 1989.

principalement des enfants, sont les principales victimes d'une «fièvre d'assez mauvaise nature», qui affaiblit considérablement les corps sans forcément provoquer la mort (sur les 140 enfants hospitalisés, 110 contractent la maladie et seulement 2 en meurent). Pour le médecin parisien F. Ruette, «il serait peut-être difficile de trouver une maladie épidémique qui ait été plus contagieuse et moins funeste».

Loin de se contenter d'enquêter sur les origines d'une maladie qu'elles attribuent pour l'essentiel à la mauvaise qualité de l'air, les autorités politiques agissent: dans un premier temps en traitant les patients (médicaments, saignées...); dans un second temps en

réaménageant l'espace pour améliorer la circulation de l'air, éliminer les risques d'humidité et éloigner les «miasmes» des malades. En quelques semaines, les autorités parviennent ainsi à éteindre les risques d'épidémie et à rétablir le calme auprès des populations environnantes.

Pour ce faire, Bonaparte et ses partisans se lancent dans une vaste entreprise, celle de l'inoculation contre la variole selon les méthodes nouvelles inspirées par l'Anglais Edward Jenner. Ce dernier a rompu avec ses prédécesseurs en inoculant aux malades un pus provenant de vaches qui avaient contracté la vaccine, une maladie semblable, mais moins virulente que la variole.

Le vaccin est en effet conçu comme le moyen de concilier la lutte pour garantir la santé publique avec l'impératif d'ordre politique et de contrôle social des populations. La lutte contre l'épidémie ne dépend plus seulement d'une action sur l'air, les cours d'eau ou le milieu, mais repose désormais sur une intervention du pouvoir médical (et étatique) à l'intérieur même des corps: en empêchant la contagion et les désordres politiques et sociaux qu'elle entraîne, la vaccination doit ainsi «terminer la Révolution».

Toutefois, dès 1802, le pouvoir bonapartiste doit faire face à un nouveau «front». Pour réduire l'insurrection menée par le général Toussaint Louverture à Saint-Domingue, Bonaparte y a envoyé un corps expéditionnaire sous le commandement du général Leclerc. Or les soldats sont victimes d'une épidémie de fièvre jaune qui rend impossible la victoire sur la guérilla des esclaves et des libres de couleur. Peints sous les traits de «barbares» assoiffés du sang des soldats français, les insurgés sont encore accusés de répandre des maladies contre lesquels les peuples «civilisés» doivent se défendre en faisant la guerre et en tournant le dos aux principes républicains mis en place depuis 1789.

Au XIX^e siècle, la relation entre épidémies et dynamiques politiques se poursuit au fil des différentes crises qui secouent la France. En particulier, l'épidémie de choléra de 1832 justifie, sous le Second Empire, la mise en œuvre des grands travaux du baron Haussmann: au nom de la lutte contre tous les foyers d'insalubrité qui empêchent la bonne circulation de l'air au sein de la capitale, il s'agit aussi de lutter contre la pauvreté et les «fléaux sociaux». Hier comme aujourd'hui, un corps réduit de spécialistes ou de professeurs de médecine ne saurait confisquer la question des épidémies, de leurs effets et des mesures sanitaires à prendre dans l'espace politique. Cette question doit faire l'objet d'un large débat public si l'on veut empêcher qu'une crise sanitaire ne soit synonyme de tentation autoritaire. ■

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA, à Saclay



JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
au CNRS-MNHN, à Paris



© 2020 Warner Bros. Entertainment Inc. Tous droits réservés/Chiabella James

Cette photo extraite de l'adaptation cinématographique de *Dune* par Denis Villeneuve (sortie prévue le 23 décembre 2020 en France) montre Paul et Jessica Atréides, deux des personnages principaux, portant un distille.

Le distille de «Dune», recycleur ultime



Dans le roman «Dune», de l'écrivain américain Frank Herbert, qui est une nouvelle fois porté à l'écran, les intrigues se cristallisent autour du contrôle de la planète désertique Arrakis. Pour survivre sur ce monde où il est crucial d'économiser l'eau, les habitants portent des «distilles», des combinaisons qui recyclent l'eau de la transpiration, de l'urine, etc. L'un des chapitres du livre «Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers», qui vient de paraître aux éditions Le Béal, interroge le réalisme de ces dispositifs. Extrait.



Le distille est sans aucun doute l'invention technique la plus originale de Frank Herbert. Porté et fabriqué par les Fremen, c'est à la fois un vêtement et un système de recyclage sophistiqué, indispensable à la survie d'un humain sur la chaude et désertique planète Arrakis. Le distille recouvre la totalité du corps, à l'exception d'une partie du visage, et fonctionne grâce à l'énergie corporelle de son porteur. Il permet de récupérer et de traiter l'humidité de l'haleine, de la transpiration, de l'urine et des excréments pour en recycler l'eau, qui sera stockée dans des poches où des tubes permettent au porteur du distille de s'abreuver. Selon Liet-Kynes, un distille en bon état et bien ajusté permet de ne pas « perdre plus d'un dé à coudre d'humidité par jour, même si vous venez à vous perdre dans le Grand Erg » [ndlr: les citations sont extraites du roman *Dune*]. Revêtir un distille demande une grande dextérité et lorsque Paul Atréides le fait de façon naturelle dès son arrivée sur Arrakis, le Planétologiste Impérial y verra un des signes de la prophétie de Muad'Dib: « Il connaîtra nos usages comme s'il était né avec eux. » En faisant jouer un rôle essentiel au distille, Frank Herbert a bien compris et intégré les enjeux de l'eau sur Arrakis, bien sûr, mais aussi sur notre planète.

L'EAU, UN FLUIDE VITAL

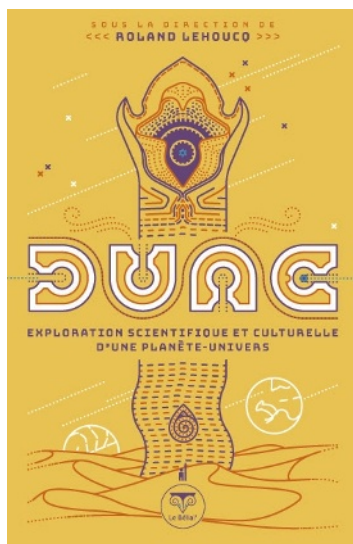
Constituant biologique fondamental, l'eau liquide est essentielle à tous les organismes vivants connus. Sur Terre, l'eau est présente sous ses trois états, solide, liquide et gazeux, et couvre 70% de sa surface. La très grande majorité de cette eau (97,2%) est maritime ou océanique et a été salée au fil du temps par la lente érosion continentale. L'eau douce est bien plus rare et résulte de la « distillation » solaire de l'eau océanique, qui s'évapore avant de retomber

pour partie sur les continents. L'eau douce ne représente que 2,8% de l'eau terrestre et se répartit de la façon suivante: 68,7% se trouvent dans les glaciers; 30,1% dans les nappes phréatiques; 0,8% dans le permafrost; 0,4% en surface et dans l'atmosphère. Au final, moins de 1% de l'eau est à la fois douce et liquide (le lac Baïkal, en Russie, est, avec ses 23 000 milliards de mètres cubes d'eau, le plus grand réservoir d'eau douce liquide de la surface de la planète). Un humain ne pouvant survivre plus de trois jours sans eau potable, l'accès à cette ressource relativement rare est un enjeu vital.

L'eau douce se répartit très inégalement, et neuf pays – le Brésil, la Colombie, la Russie, l'Inde, le Canada, les États-Unis, l'Indonésie, le Congo et la Chine – concentrent 60% du débit annuel mondial. Compte tenu de son caractère vital, de son importance économique (agriculture, industrie...) et de son inégale répartition sur Terre, l'eau douce est donc une ressource naturelle dont la gestion constitue l'objet de forts enjeux. Ainsi, risques climatiques et catastrophes naturelles peuvent être à l'origine d'une raréfaction ou d'une pollution de l'eau douce. Les activités humaines – rejets domestiques, agricoles ou industriels, détournement de cours d'eau, etc. – ont elles aussi des conséquences sur l'accès et la qualité des ressources en eau. Avec l'augmentation de la population mondiale, l'accès à l'eau est et restera durablement un enjeu stratégique majeur, et pourrait devenir la cause de guerres futures.

On comprend que sur la planète Arrakis l'eau ait une importance au moins égale à l'épice dans la galaxie [ndlr: l'« épice », substance imaginaire aux pouvoirs extraordinaires, ne pousse que sur Arrakis, d'où l'enjeu politique et économique qu'elle représente dans la saga *Dune*].

En aidant le duc Léo Atréides à ajuster son distille, Kynes décrit ainsi sa structure et son



LE REGARD DES SCIENTIFIQUES SUR UNE ŒUVRE INCONTOURNABLE

La saga de science-fiction *Dune*, parue en 1965, s'étend sur plusieurs volumes et est d'une richesse rarement égalée. Cette « planète-univers » est dotée d'une histoire qui court sur des millénaires et implique des protagonistes de tous les coins de la galaxie. Frank Herbert, l'auteur, a également pris soin de créer un monde où la science, la technologie et la culture sont parfaitement intégrées à l'intrigue et contribuent à rendre ce monde d'autant plus crédible. Il n'est pas surprenant que des scientifiques se penchent sur cette œuvre de référence de la science-fiction. Dans l'ouvrage *Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers*, Roland Lehoucq, Jean-Sébastien Steyer, Fabrice Chemla, Carrie Lynn Evans, Frédéric Landragin et d'autres éclairent de nos connaissances actuelles des sujets aussi variés que la technologie du « distille », les voyages à travers l'espace-temps, l'écosystème des vers géants, la chimie de l'« épice », la place des femmes ou encore la linguistique à partir de la langue des Fremen, les habitants de Dune.

Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers
Le Béal, 400 pages, 2020

fonctionnement: «À la base, c'est un micro-sandwich: un filtre à haute efficacité doublé d'un système d'échange de chaleur. [...] La couche au contact de la peau est poreuse, perméable à la transpiration qui rafraîchit le corps... c'est le processus normal, ou presque, de l'évaporation. Les deux autres couches comprennent [...] des filaments d'échange calorique et des précipitateurs de sel. Le sel est récupéré. [...] Les mouvements du corps, et surtout la respiration, ainsi qu'un certain effet osmotique suffisent à fournir l'énergie nécessaire au pompage. [...] L'eau recyclée circule et aboutit dans des poches de récupération d'où vous l'aspirez grâce à ce tube fixé près de votre cou. [...] L'urine et les matières fécales sont traitées dans le revêtement des cuisses.»

Le nom de cette tenue évoque bien sûr la distillation, procédé attesté depuis le 1^{er} siècle de notre ère et faisant partie des techniques inventées par les alchimistes, encore en usage en chimie moderne (alliage, calcination, sublimation et distillation). La distillation permet de séparer un mélange homogène de liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. En chauffant le mélange et/ou en diminuant la pression qui le surplombe, les liquides qu'il contient se vaporisent successivement en commençant par le plus volatil. La vapeur obtenue est condensée par refroidissement sur les parois rafraîchies d'un tube de captage au bout duquel s'écoule le distillat. Ainsi, la préparation d'une eau-de-vie passe par la distillation du résultat de la fermentation des fruits par des levures afin d'en extraire l'alcool. Cela semble tout à fait opportun de nommer «distille» (*stillsuit* en anglais) une tenue qui semble capable de purifier l'eau évacuée par le corps en lui ôtant les sels et autres impuretés qu'elle contient.

Comme l'eau douce risque de devenir une denrée rare sur Terre et qu'elle est très coûteuse à embarquer à bord des stations orbitales ou des futures missions humaines vers Mars, il ne fait aucun doute qu'un tel système de recyclage individuel pourrait s'avérer fort utile. Mais cela fonctionnerait-il comme nous l'indique Kynes?

L'EAU CORPORELLE

Notre corps contient 65% d'eau dont la plus grande part siège à l'intérieur des cellules. Nous perdons en moyenne 2,5 litres par jour sauf bien sûr en cas d'effort physique intense ou de conditions météorologiques extrêmes: 1,5 litre d'eau est évacué sous forme d'urine, 0,5 litre est transpiré en sueur, 0,3 litre s'échappe sous forme de vapeur d'eau dans la respiration et 0,2 litre se retrouve dans les selles. L'eau ainsi perdue est récupérée par l'alimentation (1 litre) et par les boissons (1,5 litre). L'eau douce est absolument indispensable à notre survie car sans aucun apport, rappelons-le, nous ne pouvons vivre plus de trois jours. >

VIVRE SANS EAU, EST-CE POSSIBLE ?

Sur Arrakis, la survie de chacun dépend de l'eau, un bien précieux extrêmement rare sur cette planète désertique. Mais une espèce imaginée par Frank Herbert déroge à la règle, le Shai-hulud (ou ver des sables) pour lequel l'eau est un poison mortel. La fiction est néanmoins rattrapée par la réalité. Sur Terre, il existe des extrémophiles capables de se passer d'eau. Par quels mécanismes parviennent-ils à survivre dans ces conditions ?

L'eau couvre 70 % de la surface de notre planète, et dans sa forme liquide, elle joue un rôle crucial chez les êtres vivants : ce solvant assure le transfert de matière et d'énergie à l'intérieur même des cellules et entre elles. Ainsi, le corps humain est constitué de 65 % d'eau, mais cette fraction s'élève jusqu'à 98 % chez les méduses ! Bien que l'eau semble indispensable, de nombreuses formes de vie sont capables de s'en passer au moins pendant un temps : c'est le cas des espèces dites « anhydrobiotiques » comme les levures, les plantes à fleurs avec leurs graines, les bactéries, les champignons avec leurs spores, et bien d'autres. Les artémies, de petits crustacés, sont capables de résister à la dessiccation pendant quinze ans sous la forme de cystes (ou kystes).

Concernant l'hygrométrie, le record sur Terre est, comme sur Arrakis, détenu par un ver : le nématode *Tylenchus* peut rester trente-neuf ans sans eau et sans aucun dommage pour l'organisme. En général, ces vers se plissent, s'enroulent sur eux-mêmes et

s'agglutinent tandis que leurs fonctions vitales ralentissent, voire s'arrêtent. Leurs tissus se déshydratent et l'eau intracellulaire est remplacée par des protéines spécifiques (protéines de choc thermique) et du tréhalose, un sucre non réducteur très visqueux qui permet de conserver un volume intracellulaire minimum tout en limitant les agrégats de biomolécules.

Le tréhalose est aussi à l'œuvre chez les artémies, mais semble absent chez les tardigrades, qui peuvent rester plusieurs décennies dans un état de dessiccation quasi totale après avoir perdu 97 % de leur eau. Ces animaux microscopiques sont par ailleurs capables de résister à des températures et des pressions extrêmes, à une forte salinité, au vide spatial et à une radioactivité hors norme. En 2017, Thomas Boothby, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, et ses collègues ont montré qu'en cas de sécheresse, les tardigrades produisent des protéines intrinsèquement désordonnées, qui forment une matrice vitrifiée protégeant les cellules. Les Shai-huluds ont-ils développé une stratégie similaire ? Quoi qu'il en soit, ces extrémophiles, réels ou fictifs, suggèrent que l'eau n'est peut-être pas obligatoire pour imaginer d'autres formes de vie ailleurs dans l'Univers.

T. C. Boothby et al., *Molecular Cell*, vol. 65, pp. 975-984, 2017;
M. Watanabe, *Applied Entomol. Zool.*, vol. 41(1), pp. 15-31, 2006.



LES TARDIGRADES

On les surnomme parfois « oursins d'eau ». Pourtant, ces animaux peuvent vivre sans eau pendant de longues périodes, au moins cinq ans pour la plupart des espèces. Ils se mettent alors dans un état dit « de cryptobiose », où leur métabolisme est presque à l'arrêt.

> Si la présence d'eau dans les urines ou les selles est manifeste, c'est le médecin italien Santorio Santorio (1561-1636) qui mit en évidence la perspiration, c'est-à-dire la perte d'eau sans sueur apparente par évaporation directe à travers la peau et les alvéoles pulmonaires (vapeur d'eau contenue dans l'air expiré). Cette évaporation participe à la dissipation des 70 à 90 watts de chaleur produite par notre métabolisme au repos.

La transpiration (ou sudation) est un phénomène plus visible que la perspiration et, comme cette dernière, se produit au niveau des pores de la peau. Les glandes sudoripares situées dans la peau «puisent» l'eau dans les capillaires sanguins qui les entourent, et produisent la sueur dont la composition est proche de celle d'une urine très diluée. Celle-ci est ensuite évacuée par les pores cutanés. En prenant l'énergie nécessaire à son évaporation dans la chaleur corporelle, la sueur joue un rôle important dans la régulation thermique de notre corps en cas d'effort ou de chaleur (c'est aussi le processus d'évaporation de l'eau mouillant notre corps qui provoque la sensation de froid en sortant d'une douche). La sudation peut alors atteindre des valeurs aussi hautes que 1,5 litre par heure ! D'où l'importance de boire beaucoup lorsque l'on exerce une activité physique intense ou lorsqu'il fait très chaud. Dans ces situations, les animaux transpirant moins, comme le chien, halètent pour évaporer de l'eau par la surface de leur langue afin de maîtriser leur température interne.

Les humains ont deux sortes de glandes sudoripares qui diffèrent par leurs fonctions et par la composition de la sueur qu'elles produisent. Les glandes eccrines sont les plus nombreuses (on en compte de trois millions à six millions) et couvrent presque tout le corps. Elles se situent surtout sur la paume des mains, la plante des pieds et le front. On comprend donc pourquoi le distille dispose d'une capuche et couvre aussi les mains et les pieds. Les glandes apocrines, que l'on trouve notamment sous les aisselles, produisent une sueur plus riche en molécules organiques (dont des phéromones). Leur transformation par des bactéries produit l'odeur typique de la transpiration. Thufir Hawat, le Mentat des Atréides, ne mâche d'ailleurs pas ses mots à propos de l'odeur d'un distille : «[...] ils puent autant les uns que les autres dès qu'ils sont en lieu clos. C'est à cause de ce vêtement qui récupère l'eau de leur corps. Ils appellent ça un "distille".»

Le fonctionnement du distille n'est bien sûr pas détaillé par Frank Herbert, mais il semble difficile qu'il atteigne les performances décrites. D'emblée se pose le problème de la récupération de la sueur : elle passe à travers une membrane poreuse pour être ultérieurement filtrée. Mais si la sueur est directement

captée sous forme liquide, elle ne jouera plus son rôle refroidissant faute de pouvoir s'évaporer, ce qui est fâcheux. Les plongeurs portant une combinaison intégrale en néoprène savent bien qu'il est dangereux de rester trop longtemps au soleil : sans évaporation de la sueur pendant une période prolongée, ils courent un risque très important d'hyperthermie provoquant étourdissements, nausées, vomissements et maux de tête. D'ailleurs, dans le film *Dune* de David Lynch (1984), les figurants jouant les Fremen portaient un costume très près du corps et peu «respirant» qui limitait l'évaporation de la sueur. Dans le désert mexicain où furent tournées les scènes sur Arrakis, tous s'accordèrent à dire que l'expérience fut très éprouvante.

COMMENT LE DISTILLE POURRAIT-IL FONCTIONNER ?

Si le distille permet l'évaporation de la sueur et le refroidissement naturel du corps, il doit aussi évacuer l'air saturé en vapeur d'eau en contact avec la peau pour le remplacer par de l'air sec à la bonne température. Dans le cas contraire, l'évaporation, et donc le refroidissement, s'arrêterait : c'est pour cette raison qu'il est utile d'aérer une pièce dans laquelle sèche du linge. Reste ensuite à condenser l'humidité avant de la traiter. La façon la plus évidente consiste à refroidir la vapeur d'eau : c'est ce qui se passe lors de la formation d'un brouillard par refroidissement d'un air humide.

Dans cette situation, capter les fines gouttelettes d'eau contenues dans le nuage et la brume est réalisable grâce à un long filet de polypropylène constitué de mailles très fines. Cette méthode est expérimentée dans les régions arides du Chili et du Pérou, où l'accès à l'eau potable demeure difficile mais le brouillard régulier. Elle fut aussi utilisée par les Romains dans le pourtour méditerranéen grâce à des tumulus pierreux plutôt qu'avec des filets. Cela ressemble tout à fait aux «pièges à vent» que Kynes père et fils installent sur Arrakis pour capter l'humidité de l'air.

Dans le distille, la déshumidification de l'air capté au voisinage de la peau doit aussi se



Sur la Station spatiale internationale, les eaux usées sont recyclées à plus de 90%



Dans le roman *Dune*, le personnage de Liet Kynes (ici dans l'adaptation cinématographique de Denis Villeneuve) joue un rôle central. Cette planétologue a une compréhension profonde d'Arrakis et veut terraformer ce monde. L'eau est donc un élément essentiel dans son projet.

faire par condensation. Mais dans ce processus, la vapeur d'eau libère très exactement la quantité d'énergie qui a été nécessaire à son évaporation ! Cela provoque alors le réchauffement de la surface sur laquelle les gouttes se forment. Pour que la condensation n'annule pas l'effet refroidissant de la transpiration, il faut que le distille soit doté d'un dispositif d'évacuation rapide de cette chaleur, sinon son porteur risque de mourir de chaud. Pour cela, le distille doit être constitué d'un matériau ayant à la fois une forte conductivité thermique (de sorte à faciliter le transfert de chaleur vers l'extérieur), une grande émissivité radiative (pour rayonner efficacement la chaleur sous forme de lumière infrarouge), et posséder une grande surface d'échange avec l'air ambiant, comme on le voit sur les radiateurs d'automobile ou sur ceux utilisés pour refroidir les composants électroniques. Afin d'éviter que la surface extérieure du distille ne soit couverte d'ailettes disgracieuses et gênant les mouvements de son porteur, on peut imaginer que cette surface soit fractale de sorte à augmenter l'aire d'échange avec l'extérieur sans trop augmenter le volume du distille.

La découverte faite par le physicien Jean-Charles Peltier (1785-1845) en 1834 pourrait aussi s'avérer utile. Il s'agit d'un effet thermoélectrique dans lequel un courant électrique provoque une différence de

température. Il se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions. L'une des jonctions se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. L'effet Peltier est utilisé comme technique de réfrigération dans des secteurs où une grande fiabilité est requise (dans le domaine spatial, par exemple), mais aussi pour des applications plus courantes comme les glacières et les réfrigérateurs de camping. La partie externe du distille pourrait alors être constituée d'une jonction Peltier, la partie intérieure froide condensant la vapeur d'eau, la partie extérieure se chargeant d'évacuer la chaleur produite par la condensation.

LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

En plus de la sueur, le distille est aussi capable de récupérer l'eau des excréments humains. Sécrétée par les reins après filtration du sang, l'urine est composée à 95% d'eau, le reste étant essentiellement de l'urée (2%), des sels dissous et des molécules organiques (elle en contient plus de 3000 différentes !). Le recyclage de l'eau des urines a bien sûr été largement étudié par les agences spatiales, par exemple afin de réduire le coût d'approvisionnement en eau de la Station spatiale internationale (*International Space Station* ou ISS). Le recyclage de toutes les eaux usées à plus de 90% n'évite pourtant pas l'envoi en orbite de près de six tonnes d'eau chaque année.

Dans l'ISS, l'urine est d'abord distillée à basse pression dans un cylindre en rotation pour pallier l'absence de gravité apparente. L'eau obtenue est ensuite mélangée avec celle provenant d'autres sources (douche ou vapeur d'eau condensée dans l'air) avant de transiter à travers une série de filtres. Enfin, les contaminants organiques et les micro-organismes sont détruits en passant dans un réacteur catalytique qui les oxyde avant une ultime filtration. L'eau obtenue peut être bue, mais elle sert également à la production de dioxygène par électrolyse.

Les selles sont aussi riches en eau : elles en contiennent environ 80%, le reste étant essentiellement des fibres de cellulose ou musculaires non digérables. Contrairement à l'urine, les selles sont plus difficiles à recycler car elles sont susceptibles de contenir des germes contaminants. Des recherches menées pour l'établissement d'une future colonie martienne ont montré que, finalement, assez peu d'eau pourrait être récupérée des selles. Cela, sans compter les problèmes psychologiques que cela poserait certainement à l'équipage qui devrait la consommer (dans la Station spatiale internationale, les astronautes russes refusent déjà de boire l'eau issue du recyclage des urines). Naturellement, si l'unique alternative est la mort par déshydratation, leur opinion pourrait changer...

> Dans sa description du distille, Kynes mentionne un filtre à haute efficacité ayant une structure en microsandwich, ce qui évoque les méthodes les plus récentes de purification d'eau par ultrafiltration ou par nanofiltration. Dans la première méthode, l'eau passe sous pression à travers une membrane constituée d'un faisceau de fibres creuses conçues dans un matériau polymère dont les pores ont une taille de l'ordre d'un centième de milliardième de mètre (0,01 micromètre). Les seules substances capables de passer sont donc celles dont la taille est inférieure à celle des pores. L'ultrafiltration permet ainsi d'éliminer toutes les particules en suspension, les bactéries et les virus, ainsi que les plus grosses molécules organiques. Pour retenir les plus petites molécules, on ajoute du charbon actif dans l'eau à traiter. Celles-ci s'adsorbent sur les grains de charbon, lesquels, trop gros pour passer à travers les pores, sont retenus par la membrane. La nanofiltration fonctionne comme l'ultrafiltration, mais en utilisant une membrane dont la porosité est dix fois plus faible, de l'ordre du milliardième de mètre (un nanomètre, d'où son nom). Cette membrane est en céramique et se présente sous la forme de longs prismes hexagonaux percés de multiples canaux dans le sens de la longueur.

Ces dispositifs d'ultra et de nanofiltration équipent la station scientifique française Concordia, située en Antarctique. Elles sont complétées par un autre procédé, l'osmose inverse, déjà utilisée pour le dessalement de l'eau de mer. Ce système, financé par l'Agence spatiale européenne, permet de recycler les eaux usées d'environ 25 personnes vivant en autarcie complète pendant les neuf mois d'hivernage.

COMMENT ALIMENTER LE DISTILLE ?

La purification de l'eau nécessite évidemment de l'énergie: un système d'ultrafiltration commercial consomme environ 1 kilowattheure pour purifier un mètre cube d'eau, valeur qui monte à 3 kilowattheures pour un dispositif utilisant l'osmose inverse. La quantité d'eau à traiter étant d'environ quelques litres par jour, cela conduit, en se donnant un peu de marge, à une puissance nécessaire de l'ordre de 200 milliwatts pour la seule purification, à laquelle il faut ajouter la consommation du système de pompage et de refroidissement. D'après Kynes, le distille fonctionne uniquement grâce à l'énergie du corps humain, notamment celle des mouvements. Est-ce vraiment envisageable ?

En 2013, quatre étudiants de l'université de Rice, au Texas, ont imaginé des chaussures qui transforment en électricité l'énergie produite par le choc des talons sur le sol. Une idée qui semble tout à fait intéressante quand on se rappelle que ce sont des pompes situées sous le talon qui sont censées faire circuler l'eau dans



Moins de 1% de l'eau terrestre est à la fois douce et liquide

le distille. Le prototype a une puissance moyenne de 400 milliwatts, mais sur un sol dur et dans des conditions de laboratoire plutôt que sur le sable des déserts d'Arrakis ! Et quand on sait que les Fremen doivent soigneusement choisir le rythme de leur marche pour ne pas attirer l'attention des vers des sables, il faut craindre que la production d'énergie par ce biais ne soit pas suffisante. On peut aussi récupérer l'énergie liée aux mouvements de l'ensemble du corps (du tronc, des bras ou des jambes: cette question est désormais à l'ordre du jour pour alimenter les dispositifs numériques qui envahissent nos vies, du téléphone portable au vêtement connecté).

L'ordre de grandeur de la puissance mécanique de la majorité des mouvements est de l'ordre de 1 à 10 watts, à comparer aux 20 à 100 milliwatts nécessaires aux objets connectés, et aux 200 milliwatts pour notre distille.

Si la puissance disponible semble être suffisante, la récupérer de façon efficace n'est pas si simple. Il existe deux grandes familles de récupérateurs de l'énergie d'une personne, caractérisées par la nature de l'énergie mécanique convertie. Un système inertiel contient une masse en déplacement libre sous l'effet des accélérations du corps de l'utilisateur. Un générateur transforme l'énergie cinétique de la masse en électricité. La seconde famille est constituée de systèmes qui exploitent directement les contraintes, les déformations ou les frottements. La source d'énergie mécanique est alors la force musculaire de la personne. Dans un système inertiel, l'ergonomie impose de réduire au maximum le volume et la masse du récupérateur d'énergie, ce qui limite de fait la quantité d'énergie mécanique convertible. En revanche, pour les systèmes directs, la limite est fixée par la quantité d'énergie maximale qu'il est possible de prélever sans entraver le mouvement. En pratique, ces dispositifs de récupération de l'énergie mécanique du corps ne sont capables de fournir, au mieux, qu'une puissance de l'ordre de quelques dizaines de milliwatts.

C'est un peu juste, mais il ne semble malgré tout pas totalement impossible de faire fonctionner un distille à l'énergie humaine: bien joué, monsieur Herbert !



BIBLIOGRAPHIE

Recyclage de l'eau à bord de la Station spatiale internationale :
http://bit.ly/PLS517_ISS

M. Geisler, Récupération d'énergie mécanique pour vêtements connectés autonomes, mémoire de thèse, 2017
(http://bit.ly/PLS517_vetements).

L'eau : attention, fragile !
Dossier Pour la Science
n° 58, janvier 2008.

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 Bd Président Wilson - CS40032 – 67085 Strasbourg Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG20NOE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐

FORMULE PAPIER

- 12 n° du magazine papier
- + **UN CADEAU**

4,90€
PAR MOIS

☐

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier
- + **UN CADEAU**

6,50€
PAR MOIS

☐

FORMULE INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne
- + **UN CADEAU**

8,20€
PAR MOIS

2 / Mes coordonnées

Nom:
Prénom:
Adresse:
.....
Code postal

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 Ville:
Tél.:

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

E-mail:@
(Indispensable pour la formule intégrale)
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlasience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et nous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal | | | | | Ville: | | | | |

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

[illegible]

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom:

Adresse:

Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier: Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

N° de référence unique de mandat (RUM)

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement Ne rien inscrire