



SOUS LA CALOTTE DE GLACE d'une planète, un océan pourrait héberger de drôles de formes de vie comme cet étrange «poisson» bioluminescent : cette espèce imaginaire est inspirée de la faune abyssale connue sur Terre.

présence de steppes et donc que la glaciation de Hoth ne serait que partielle. Cette question s'applique aussi à la Terre boule de glace.

Autre remarque sur les tauntauns : ces herbivores ont le sang chaud. En effet, pour éviter que Luke Skywalker ne tombe en hypothermie et ne meure de froid, Han Solo, alors pris dans un blizzard, sacrifie sa monture et glisse son ami dans la dépouille encore chaude en attendant les secours.

Avec de tels êtres évoquant des mammifères, la faune de Hoth rappelle plutôt celle de la dernière glaciation terrestre (il y a entre 110 000 et 10 000 ans) où des rhinocéros laineux côtoyaient des mammoths, et où des chasseurs-cueilleurs pouvaient joindre à pied l'Eurasie et l'Amérique du Nord grâce à une calotte glaciaire qui recouvrait alors toute une partie de l'hémisphère Nord.

Les animaux de la planète Hoth, avec leur sang chaud et leur fourrure, semblent donc bien adaptés aux températures extrêmes. Ce n'est pas forcément le cas des monstres peuplant d'autres planètes glacées de la science-fiction : ainsi, dans le film *Star Trek* de J. J. Abrams (2009), James Kirk se retrouve sur la très froide planète Delta Vega. Il devient vite la proie d'un énorme prédateur amphibie qui transperce la glace et le pourchasse avec ses longues pattes. On peut se demander comment ce monstre à peau nue est capable de supporter des températures aussi basses, que ce soit dans l'eau ou sur la banquise. Une réponse possible est que l'activité métabolique

produit de la chaleur, dégagée dans le volume du corps et évacuée par la surface. Comme le volume augmente avec la taille plus vite que la surface, un animal de grande taille peut avoir une température interne supérieure à l'extérieure. Ce phénomène est envisagé pour certains grands dinosaures et nommé «homéothermie de masse» ; mais il est difficilement compatible avec les longues excroissances mobiles du monstre de Delta Vega.

Un corps glacé bien réel

Le Système solaire contient plusieurs corps glacés, comme Europe, une lune de Jupiter dont la température de surface avoisine -150°C . Environ quatre fois plus petit que la Terre, ce satellite est entièrement recouvert d'une croûte de glace dont l'épaisseur est estimée à quelques dizaines de kilomètres. Cette calotte glaciaire couvrirait un océan liquide profond d'environ 90 kilomètres. De nombreux indices confirment l'hypothèse d'eau liquide. En surface, la glace striée et craquelée présente de nombreuses lignes, sortes de dépressions rectilignes interprétées comme des fossés d'effondrement. Ces structures témoigneraient d'une «tectonique» glaciaire importante et active, comme c'est le cas de la banquise terrestre qui bouge sur l'océan. Par ailleurs, des geysers d'eau ont été récemment détectés sur Europe. On retrouve une structure similaire sur Encelade, une lune de Saturne.

Comme ces deux satellites sont petits, l'eau n'atteindrait pas une pression suffisante pour devenir solide en profondeur. Le fond de l'océan serait alors en contact avec un manteau silicaté. À cette interface, une chimie complexe pourrait se développer, renforçant l'espoir – loin d'être confirmé – que des formes de vie dites extrémophiles, comparables à celles que l'on trouve dans les dorsales océaniques terrestres ou dans les lacs subglaciaires d'Antarctique, pourraient apparaître. Pour bon nombre d'exobiologistes, Europe et Encelade sont les meilleurs candidats à la présence de vie dans le Système solaire. Un nouveau programme rassemblant les agences spatiales européenne, américaine, japonaise et russe, est envisagé à l'horizon de 2020 pour explorer les lunes glacées de Jupiter. La dernière sonde en date ayant visité Jupiter et ses satellites est *Galileo*, restée en orbite autour de la géante gazeuse entre 1995 et 2003.

Et si les premiers êtres extraterrestres n'étaient pas les Martiens mais les Européens ? La science-fiction s'est, bien sûr, déjà emparée de la question : dans le récent *Europa Report*, film de l'Équatorien Sebastián Cordero (2013), les survivants d'une mission internationale explorant l'océan subglaciaire du satellite font une terrible découverte...

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Algorithmes psychédéliques

Grâce aux théories d'Alan Turing sur la morphogenèse, l'Australien Jonathan McCabe crée des œuvres spectaculaires qui évoquent, entre autres, des intérieurs de cellules.

Loïc MANGIN

En 1952, Alan Turing publiait un article intitulé *The chemical basis of morphogenesis* [Les Fondements chimiques de la morphogenèse]. Il y proposait des mécanismes de formation de motifs et de formes chez les animaux et les plantes à partir d'une simple équation, celle dite de réaction-diffusion. Schématiquement, des substances diffusent dans un milieu et interagissent via des réactions d'inhibition et d'activation. Les rayures du tigre, les taches de la girafe, les motifs des coquillages, la disposition des feuilles sur une tige et même la formation des doigts s'expliqueraient par le modèle de Turing.

Les biologistes ne sont pas les seuls à avoir exploité ses vertus. Physiciens et géologues se le sont également approprié, mais aussi les artistes. C'est le cas de Jonathan McCabe, qui vit à Canberra, en Australie. Ses œuvres, qui ressemblent à des coupes tissulaires, à des intérieurs de cellules ou à des motifs iridescents dont sont parés poissons et lézards (voir la page ci-contre), sont forgées à l'aide des équations de Turing.

Cette technique relève de l'art dit génératif. De quoi s'agit-il ? Pour s'en revendiquer, l'artiste doit utiliser un système autonome qui, en dehors de toute intervention humaine, « décide » d'une œuvre ou au moins de cer-

taines de ses composantes. Le système est souvent un algorithme informatique (c'est le cas pour J. McCabe), mais des artistes utilisent des processus biologiques, des contraintes mathématiques, des robots...

Des fugues de Bach, les *Cut-up* de William Burroughs (un texte est découpé et réarrangé), les ouvrages du mouvement Dada et de l'Oulipo sont autant d'exemples d'art génératif.

J. McCabe a remplacé les cellules des êtres vivants par des pixels dont la couleur est définie par le programme qu'il a mis au point. De la même façon que les réactions chimiques dans une cellule influent sur celles des voisines, l'état d'un pixel dépend de celui de son environnement.

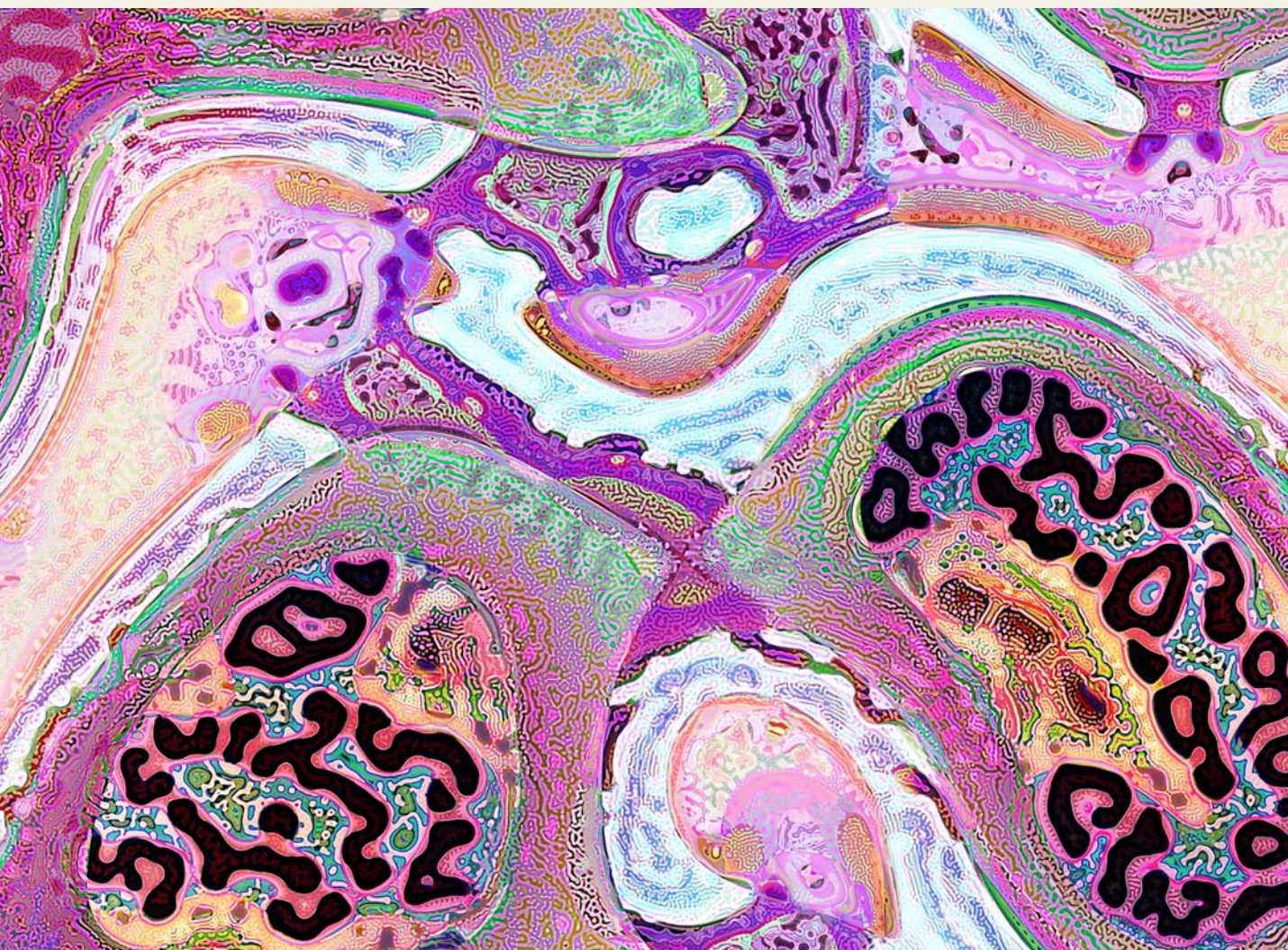
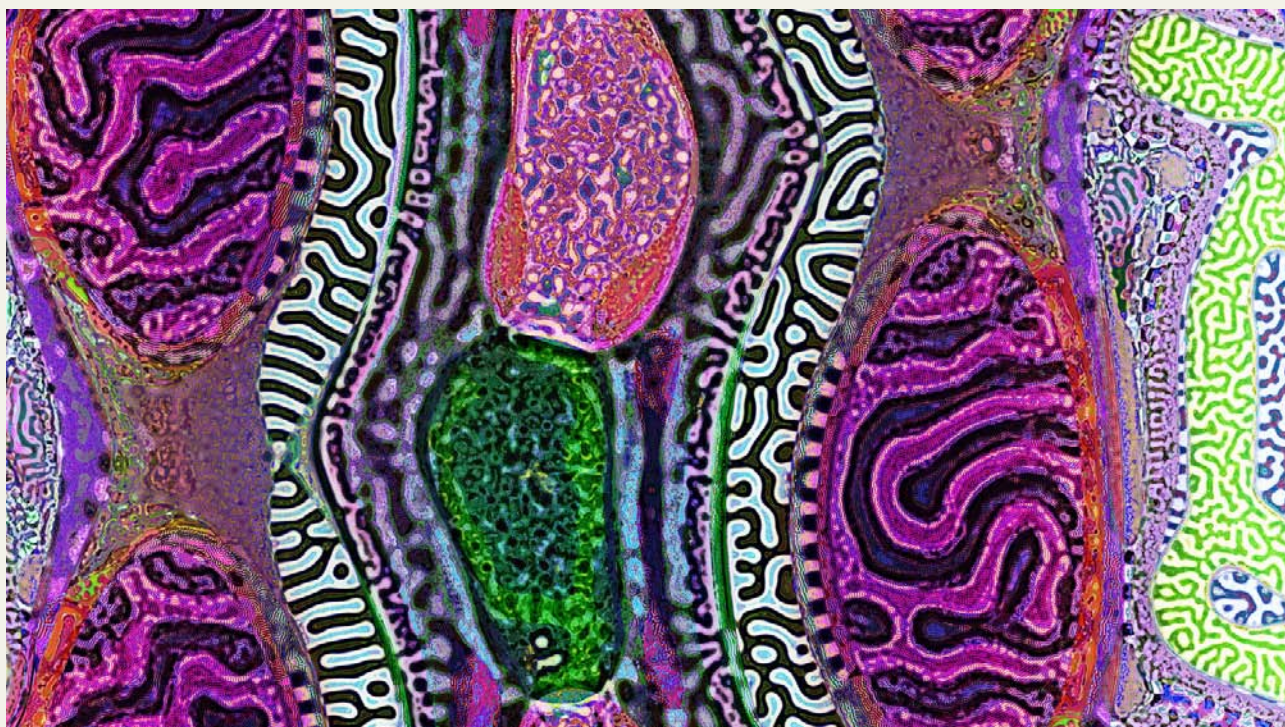
Les premières œuvres de l'Australien étaient simples, en noir et blanc. Puis, en superposant (virtuellement) les processus de Turing, il a obtenu des motifs complexes, multi-échelles, où de larges bandes constituées de petits points coexistent avec des tourbillons multicolores. Lorsqu'un motif – au départ imprévisible – lui plaît, J. McCabe ajoute parfois un algorithme supplémentaire, dit génétique, pour obtenir des variations sur un même thème. ■

J. McCormack et al., *Ten questions concerning generative computer art*, *Leonardo*, vol. 47, n° 2, pp. 135-141, 2014.

Œuvres de J. McCabe : <http://bit.ly/PLS-McCabe>

Des fugues de Bach, les *Cut-up* de Burroughs, les textes Dada et de l'Oulipo... sont autant d'exemples d'art génératif.





IDÉES DE PHYSIQUE

Des frites sous haute tension

L'application de puissantes impulsions de champ électrique à des pommes de terre facilite la découpe des frites et améliore leur cuisson.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Des frites ou des chips moins grasses et de bel aspect, même après décongélation ? Depuis plusieurs années, l'industrie agroalimentaire a inclus dans les chaînes de production de ces aliments une étape où la pomme de terre est soumise à des hautes tensions. En appliquant un champ électrique adéquat, on peut en effet fragiliser ou détruire des cellules, et ainsi modifier les propriétés du matériau biologique. L'effet biophysique en jeu est nommé électroporation. En quoi consiste-t-il et quels sont ses atouts ?

pas étonnante. En raison de l'agitation thermique des molécules, des trous dans la membrane peuvent se former spontanément, même en l'absence de champ ; mais ils sont minuscules (de l'ordre du nanomètre) et se referment très vite (à l'échelle de la nanoseconde). Par quel mécanisme le champ électrique les ouvre-t-il davantage et les stabilise-t-il ?

En fait, la question n'est pas totalement élucidée. Selon l'interprétation dominante, le champ électrique modifierait la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane : il chargerait, grâce aux ions

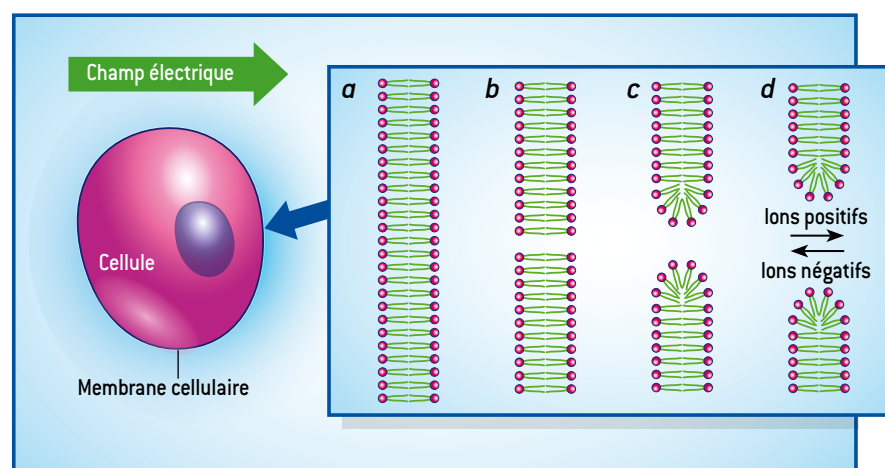
présents, les deux « armatures » de cette dernière et augmenterait ainsi la force qui réunit les deux couches lipidiques. Selon ce schéma, il s'ensuit une pression, d'origine électrostatique, qui amincit la membrane au point que cette dernière se déchire lorsque la surtension atteint une valeur de l'ordre du volt.

Une autre explication, qui n'est pas exclusive de la première, est que, à partir d'une certaine taille du pore, les molécules de la membrane se réorientent spontanément de façon à présenter leurs « têtes » face au milieu aqueux, situation énergétiquement

Des trous dans les cellules

Examinons ce qui se passe quand une cellule vivante est soumise à un champ électrique intense. La membrane cellulaire est constituée principalement d'une double couche de molécules lipidiques de quelques nanomètres d'épaisseur, qui sépare le milieu intracellulaire de son environnement (voir la figure 1). Cette bicouche se comporte comme un condensateur électrique chargé sous une tension de l'ordre de 0,1 volt ; ce « potentiel transmembranaire » est dû à un léger déséquilibre de la concentration des ions de part et d'autre de la membrane. Quand la membrane est soumise à un champ électrique suffisamment intense, elle « claque » : elle devient conductrice et perméable.

Ce claquage est dû à la formation de pores. En soi, la présence de pores n'est



1. LA MEMBRANE QUI DÉLIMITE une cellule biologique est formée d'une double couche de molécules lipidiques ayant une « tête » (en rose) hydrophile et une « queue » (en vert) hydrophobe (a). De minuscules ouvertures naissent spontanément sous l'effet de l'agitation thermique (b). Si le pore est de taille suffisante, les molécules de la bicouche adoptent autour de lui une configuration énergétiquement plus favorable (c). Un canal est ainsi formé, où peuvent passer des ions et des molécules d'eau. Un champ électrique intense favorise cette circulation, ce qui stabilise le pore et l'agrandit de façon irréversible (d).

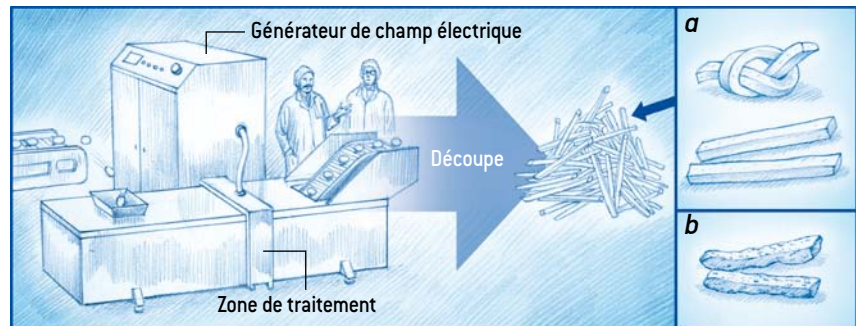
plus favorable (car la « tête » des molécules lipidiques est hydrophile, et leur « queue » hydrophobe). Il se forme ainsi un canal stable, où peuvent circuler les molécules d'eau et les ions (voir la figure 1).

Le devenir de ces trous dépend cependant de la tension appliquée. Si elle reste modérée, les pores sont réversibles : une fois le champ supprimé, ils se referment. Mais au-delà d'un certain seuil de tension, la membrane est définitivement rompue et la cellule condamnée à mourir.

Des applications médicales sont possibles, par exemple pour tuer des cellules cancéreuses ou des bactéries. Mais un autre intérêt de l'électroporation est que lorsque les membranes cellulaires sont percées, le contenu des cellules devient accessible. Autrement dit, l'électroporation facilite l'extraction ou la distillation à froid (donc sans les dénaturer) de composants tels que des arômes, des colorants, ou tout simplement les jus de fruits ou le sucre de la betterave.

La libération de l'eau contenue dans les cellules a par ailleurs des conséquences sur les propriétés mécaniques des fruits ou légumes traités. Les cellules végétales sont entourées d'une paroi cellulaire. Lorsque les cellules ont toute leur eau, les pressions exercées entre les cellules et leurs parois s'équilibrent, ce qui maintient la forme des cellules et confère de la rigidité au port du végétal lui-même. Si les cellules se vident d'eau, elles se rétractent ; l'équilibre est alors rompu et les parois cellulaires sont fragilisées. Autrement dit, le tissu végétal s'assouplit. La découpe en est facilitée : elle sera plus nette et exigera moins d'énergie. Ainsi, avec un traitement de pommes de terre par électroporation (voir la figure 2), on peut diminuer de moitié la force nécessaire pour la découpe !

La libération de l'eau contenue dans les cellules améliore aussi les processus de congélation ou de séchage. Ainsi, quand on congèle des frites (ou des chips) traitées, les cristaux de glace se forment pour une grande part en dehors des cellules et détruisent donc moins ce qui reste des structures cellulaires : la décongélation fournira des frites moins endommagées.



2. L'APPLICATION D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE intense et pulsé à des pommes de terre a pour effet de perforer les membranes cellulaires du légume, ce qui assouplit ses tissus (au point de pouvoir faire des nœuds...). La découpe des frites est alors plus facile et les surfaces de coupe sont beaucoup plus lisses (a) que celles des frites de pommes de terre non traitées (b). On obtient ainsi des frites qui, notamment, absorbent moins d'huile à la cuisson.

Par ailleurs, si l'on fait sécher un pétale de chips dans de l'air chaud, l'évaporation s'amorce d'abord en surface, mais elle se poursuit par le transport de l'eau de l'intérieur du pétale jusqu'à l'extérieur – ce transport étant facilité par la circulation de l'eau dans le milieu extracellulaire. Dans une étuve à 50 °C, le taux d'humidité d'une rondelle de pomme de terre diminue ainsi de 80 % à 10 % en moins de deux heures, au lieu des deux heures et demie habituelles.

Des frites moins grasses

L'électroporation est aussi intéressante pour la friture. Quand on plonge une frite dans un bain d'huile chaude, l'eau du bûtonnet de pomme de terre commence à bouillir à sa surface et s'évacue à travers l'huile sous la forme de bulles. Par ailleurs, la couche de vapeur d'eau qui se forme à la surface de la frite conduit beaucoup moins bien la chaleur que l'eau liquide ; elle isole thermiquement la frite et limite la pénétration de l'huile.

Or les frites traitées par champ électrique développent une couche de vapeur plus épaisse que les frites non traitées, ce qui réduit la déshydratation de l'aliment et l'absorption d'huile (jusqu'à 30 % de matières grasses en moins). Qui plus est, la surface de la découpe étant plus nette et moins rugueuse, on a deux avantages supplémentaires. D'une part, la superficie totale de la frite en contact avec l'huile

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



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

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Kotnik *et al.*, Cell membrane electroporation – Part 1: The Phenomenon, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28(5), pp. 14-23, 2012.

A. Janositz *et al.*, Pulsed electric fields and their impact on the diffusion characteristics of potato slices, *Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 1939-1945, 2011.

est inférieure ; d'autre part, le drainage de l'huile est facilité. Il en résulte des frites plus légères et plus croustillantes !

Quelles caractéristiques le champ électrique doit-il avoir dans les applications ci-dessus ? Tout d'abord, un champ continu est inutile : la perméabilisation de la membrane cellulaire est un phénomène dynamique qui, avec la réorganisation des charges dans les milieux intra- et extracellulaire, s'estompe en un temps de l'ordre de la microseconde. Il vaut donc mieux produire des impulsions brèves et répétées pour un maximum d'efficacité.

Ensuite, sachant que la taille d'une cellule est de l'ordre de dix micromètres, des champs électriques d'intensité supérieure au kilovolt par centimètre sont nécessaires pour que la différence de potentiel à l'échelle de la cellule dépasse le volt,

seuil approximatif pour que la membrane soit durablement percée. Pour traiter des pommes de terre d'une dizaine de centimètres, il faut donc des tensions de l'ordre de dix kilovolts.

Comment créer ces hautes tensions et les pulser ? On utilise pour cela un générateur inventé par l'ingénieur allemand Erwin Otto Marx en 1924. Son principe est simple. Dans un premier temps, on charge des condensateurs en parallèle. Puis on bascule rapidement les connexions (la difficulté technique est là) afin de placer tous ces condensateurs en série. Le résultat est une tension égale à la tension initiale multipliée par le nombre de condensateurs. On déclenche alors l'impulsion électrique en faisant décharger ces condensateurs à travers deux électrodes, placées dans le réacteur d'électroporation où est traité l'aliment. ■

Toutes les ARCHIVES

■ Pour la Science

■ Dossier
Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

QUESTION AUX EXPERTS

Le vin blanc donne-t-il plus mal à la tête que les autres alcools ?

Toutes les boissons alcoolisées peuvent provoquer des maux de tête, et le vin blanc ne semble pas la pire...

Henri-Jean AUBIN



Les maux de tête causés par le vin ont été rapportés dès l'Antiquité. Dans son ouvrage *De arte medica*, le médecin romain Aulus Cornelius Celsus (-25 à 50) écrit : « Dans certains cas, il se déclare [dans la tête] une douleur plus vive, qui toutefois disparaît promptement et n'est pas mortelle ; celle-ci se manifeste sous l'influence du vin [...] ». En fait, toute boisson alcoolisée est susceptible de déclencher des maux de tête, immédiatement ou après un délai allant jusqu'à une douzaine d'heures.

Quels sont les composants des boissons alcoolisées qui déclenchent les douleurs ? L'éthanol, qui est avec l'eau le seul composant commun à toutes ces boissons, y participerait, mais il n'est semble-t-il pas le seul en cause.

En 2008, Paola Nicoletti, de l'Université de Florence, et ses collègues ont montré sur des cochons d'Inde qu'il provoque une hypersensibilité du nerf trijumeau (qui innervait la face), sans doute en partie responsable des maux de tête.

Une fois absorbé, l'éthanol est transformé en acétaldéhyde. L'accumulation de ce composé entraîne des symptômes désagréables : maux de tête, rougeur du visage, nausées, vomissements, malaise, palpitations... Chez la plupart des gens, l'acétaldéhyde est vite dégradé en acétate par une série d'enzymes. Cependant, certaines personnes, pour des raisons génétiques, ont des enzymes peu efficaces, qui laissent une certaine quantité d'acétaldéhyde s'accumuler. De multiples

enzymes sont impliquées dans la dégradation, et l'efficacité métabolique globale varie de façon continue dans la population, de sorte que ce mécanisme pourrait jouer un rôle plus ou moins important selon le profil génétique de chacun.

En 1987, Julia Littlewood, de l'Hôpital Queen Charlotte, à Londres, et ses collègues ont étudié des sujets prétendant que le vin rouge leur donnait mal à la tête, mais pas la vodka. Après confirmation de leurs affirmations, on a soupçonné l'intervention d'autres composés que l'éthanol dans les maux de tête.

De nombreux suspects

Les sulfites ont longtemps été incriminés, mais on pense aujourd'hui qu'ils ne jouent qu'un rôle marginal. En effet, ils sont présents dans de nombreux aliments (ils sont par exemple environ cinq fois plus abondants dans les fruits secs que dans le vin) qui ne sont pas associés à des céphalées. En outre, aucune étude n'a mis en évidence un lien entre sulfites et migraines.

L'histamine, la tyramine et les phényléthylamines ont aussi été soupçonnées, sans qu'aucune étude n'ait pu infirmer ou confirmer leur implication. Les tanins, les polyphénols et les flavonoïdes pourraient avoir un rôle, en déclenchant la libération de sérotonine, un neuromédiateur (une molécule assurant la communication entre neurones) qui semble impliqué dans les maux de tête.

Quel est alors l'alcool qui donne le plus mal à la tête ? Il est difficile de trancher, en raison des variations métaboliques individuelles et parce que les composés soupçonnés se trouvent en proportions très variables dans les différentes boissons.

Les quelques enquêtes réalisées chez des patients migraineux donnent des résultats contradictoires. Ainsi, celle de Christian Wöber, de l'Université médicale de Vienne, en 2006, place le vin rouge en première position des boissons alcoolisées susceptibles de déclencher un mal de tête, devant le vin blanc, les alcools forts puis la bière, tandis que celle de Richard Peatfield, de l'Hôpital Charing Cross, à Londres, en 1995, incrimine d'abord la bière.

Nombre de chercheurs anglo-saxons pensent malgré tout que le vin rouge déclenche plus de céphalées que les autres boissons alcoolisées, même si toutes ces dernières peuvent en provoquer. Quelques neurologues bordelais ont incriminé le vin blanc dans les années 1980 et 1990, mais leurs travaux sont souvent jugés partisans. Pour trancher, il faudrait réaliser des études expérimentales chez l'humain, en comparant l'effet des doses et des alcools chez des personnes migraineuses et non migraineuses...

Henri-Jean AUBIN est professeur à l'Université Paris-Sud, chercheur à l'Inserm, praticien à l'Hôpital Paul Brousse et président de la Société française d'alcoologie.