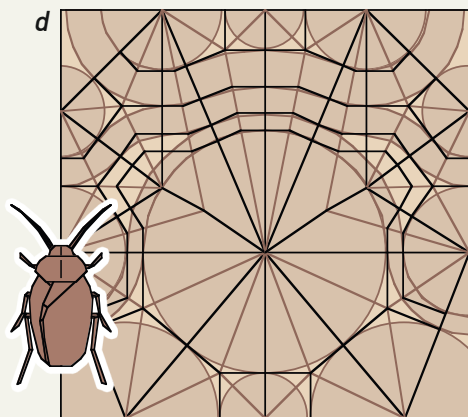




Dans les années 1990, les origamistes ont mis au jour quelques principes qui ont conduit à l'élaboration d'une sorte de mode d'emploi.

La première étape consiste à dessiner une structure en forme d'arbre dont les branches correspondent aux diverses parties du modèle, telles les pattes et les mandibules. Cette structure constitue un guide pour la construction de la base de l'origami, que l'on complexifie ensuite pour donner du réalisme au pliage (voir la figure c). Le passage de la structure à la base de l'origami est l'étape la plus complexe.

À chaque branche correspond un rabat du papier. Un tel rabat est obtenu, par exemple, à partir d'un carré que l'on plie en deux selon la diagonale, puis encore jusqu'à obtenir une « pointe » étroite et effilée qui sera une patte, un bras, une aile... Quand on déplie le papier, on constate que la partie utilisée pour le rabat est approximativement un quart de cercle situé à un coin du carré. On peut imaginer d'autres types de rabats construits à partir d'un demi-cercle ou d'un cercle entier au milieu du papier. Au final, une structure arborescente d'un origami correspond donc à une série de zones circulaires, entières ou non, disposées sur le papier.

Le problème devient celui du remplissage d'une surface avec des cercles, un problème qui a été beaucoup étudié par les mathématiciens. De leurs travaux ont émergé quelques règles grâce auxquelles on complète le pavage de cercles afin d'obtenir le schéma de plis de la base (voir la figure d). Ainsi, l'une des règles stipule que chaque centre de cercles est un sommet.



Ce protocole a bouleversé l'art de l'origami et l'on peut désormais en faire « à la demande ». Robert Lang, ancien physicien à la NASA et aujourd'hui origamiste professionnel, a conçu un logiciel nommé *TreeMaker*, téléchargeable sur Internet, qui calcule le schéma de pliage à partir de n'importe quelle structure en arbre.

Les méthodes et les principes de l'origami ne sont pas cantonnés aux sphères artistiques et mathématiques ; ils ont aussi leur place dans le monde de la technologie où les applications sont nombreuses et variées. Ainsi, en 2002, R. Lang a été sollicité par le Laboratoire *Lawrence Livermore* afin de concevoir, pour un télescope spatial, une lentille de 100 mètres de diamètre qui pourrait tenir dans le cylindre de trois mètres de diamètre du lanceur... Un prototype de cinq mètres de diamètre a d'ores et déjà confirmé la faisabilité du projet. Autres exemples : un stent (un dispositif qui maintient ouverte l'artère où il est inséré) a été conçu sur le modèle des « bombes à eau » ; un airbag peut être replié dans son réceptacle grâce aux méthodes de l'origami.

Plus étonnant, en octobre 2012, Mark Neyrinck, de l'Université Johns Hopkins, et Sergei Shandarin, de l'Université du Kansas, ont montré que l'on pouvait comparer l'agencement des grandes structures cosmiques aux plis d'une figure d'origami : cet art du papier aiderait ainsi à mieux comprendre la répartition de matière noire dans l'Univers ! ■

Le logiciel *TreeMaker* conçu par Robert Lang est téléchargeable gratuitement à l'adresse : <http://tinyurl.com/lang-treemaker>



IDÉES DE PHYSIQUE

Des frottements classés X

Mettant à profit l'électricité produite par le frottement, de petits émetteurs portables de rayons X seront bientôt disponibles.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

En 2008, des physiciens américains ont créé la sensation en montrant qu'un rouleau de ruban adhésif déroulé sous vide émet des rayons X au niveau de la zone de décollement. En travaillant sur ce résultat *a priori* anecdotique, ces chercheurs ont mis au point des sources de rayons X qui se révèlent utilisables en pratique : ne nécessitant pas de générateur de haute tension comme les sources classiques, elles ont l'avantage d'être aussi compactes qu'un téléphone mobile. Mais comment passe-t-on d'un simple rouleau de bande adhésive à des rayons X ?

Des rayons émis par des électrons stoppés net

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques, dont la longueur d'onde est comprise entre un centième de nanomètre et dix nanomètres (inférieure à celle des ultraviolets). Cela correspond à des photons (de lumière non visible) d'énergie comprise entre 2×10^{-17} et 2×10^{-14} joule soit, dans des unités plus adaptées, entre 100 et 10^5 électronvolts.

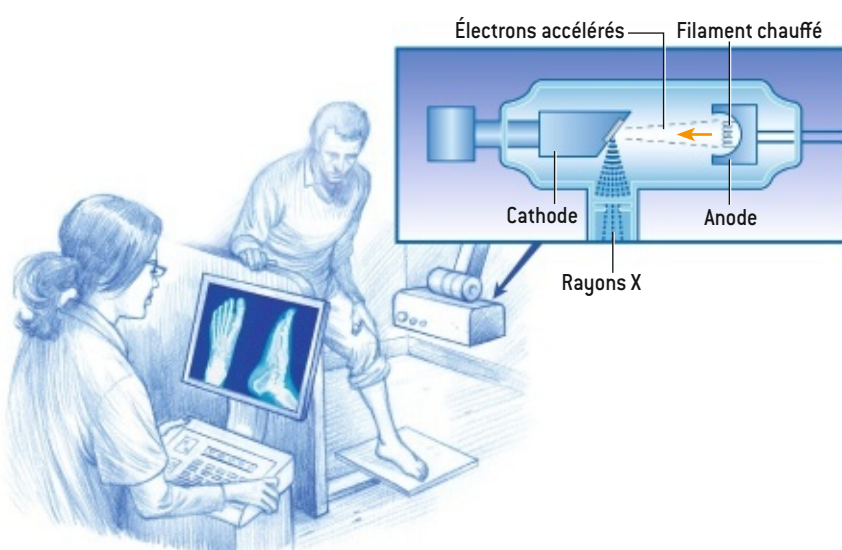
Les plus énergétiques de ces rayons (au-delà de dix kiloélectronvolts), qualifiés de X durs, peuvent traverser de grandes épaisseurs de matière, comme celle d'un corps humain ou d'un bagage. En jouant sur les différences de pouvoir d'absorption des atomes, par exemple entre ceux des tissus mous et ceux des os, on peut alors réaliser des images de la structure interne d'un objet. D'où l'utilisation des rayons X

pour les radiographies médicales ou pour les contrôles de sécurité des bagages.

Comment produire des rayons X ? Il y a émission d'ondes électromagnétiques dès que des charges électriques sont accélérées ou freinées. Pour que soient émis des rayons de petite longueur d'onde, la vitesse des charges doit varier très rapidement. C'est le cas d'électrons très énergétiques qui sont freinés, puis stoppés par de la matière : ils émettent un rayonnement caractéristique (nommé *Bremsstrahlung*, ou rayonnement de freinage) à très large spectre, auquel peut s'ajouter le rayonnement dû à la désexcitation des atomes de la cible. C'est le

principe du « tube de Coolidge », inventé il y a 100 ans et toujours largement utilisé (voir la figure 1).

Dans ce dispositif, des électrons sont émis en grand nombre par un filament de tungstène chauffé par un courant électrique. Ils sont alors accélérés par une différence de potentiel électrique : pour qu'il y ait émission de rayons X, les électrons doivent acquérir une énergie au moins équivalente à celle des photons X, d'où la nécessité d'une haute tension (quelques dizaines de kilovolts). Par ailleurs, pour que les électrons ne soient pas ralentis durant leur (lente) accélération, le vide



1. LES SOURCES CLASSIQUES DE RAYONS X sont les « tubes de Coolidge ». Dans un tel dispositif, un filament métallique chauffé par un courant émet des électrons. Ces derniers sont accélérés par une haute tension électrique entre l'anode et la cathode, et viennent frapper une surface oblique de tungstène posée sur la cathode. Le freinage brutal des électrons entraîne l'émission d'un rayonnement électromagnétique dont une bonne partie est composée de rayons X.

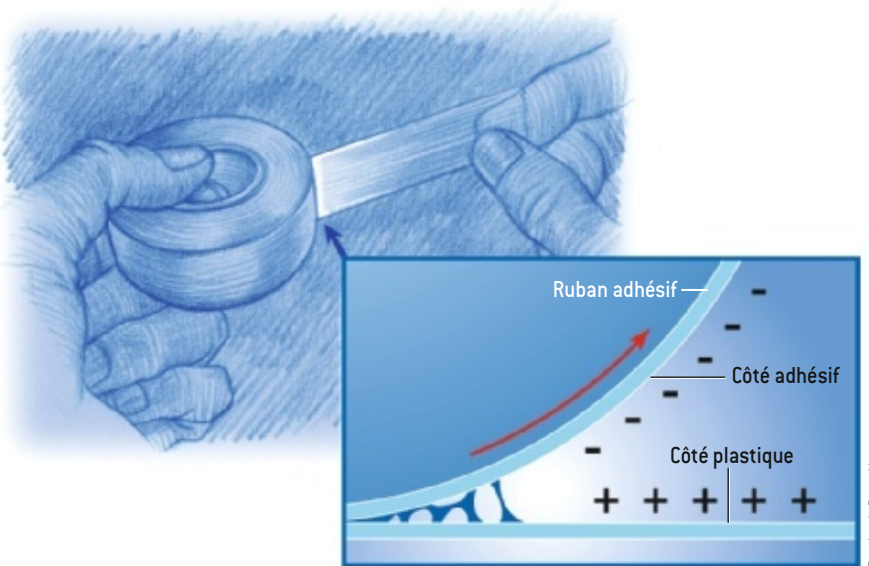
régnant dans le tube doit être de grande qualité (un milliardième d'atmosphère). Les électrons atteignent alors une cible métallique, généralement du tungstène ou du molybdène, où leur freinage brutal engendre le rayonnement désiré. Un ensemble d'écrans permet alors de diriger les rayons X vers l'objet à sonder. Haute tension, vide poussé, tube fragile... : la mise en œuvre du tube de Coolidge reste délicate.

Recourir à la triboélectricité

Depuis le tube de Coolidge, d'autres sources de rayons X ont vu le jour, notamment pour analyser la structure de la matière à l'échelle atomique : il s'agit des synchrotrons, accélérateurs de particules en anneau qui occupent tout un bâtiment. La voie n'était donc pas celle de la miniaturisation... jusqu'à ce qu'en 2008, Seth Putterman et ses collègues, à l'Université de Californie à Los Angeles, s'intéressent à la triboluminescence. Ce phénomène est associé à la triboélectricité, c'est-à-dire l'apparition d'électricité statique lorsque deux surfaces sont frottées ou séparées. Les tensions électriques produites suffisent parfois à provoquer, lors de la séparation des surfaces, de petites décharges électriques qui émettent de la lumière.

En 1939, l'Américain E. Newton Harvey, grand spécialiste de la bioluminescence, avait observé ce phénomène avec un simple ruban adhésif. Chacun peut reproduire l'expérience chez soi : lorsqu'on dévide rapidement le ruban, une lumière bleutée est émise à l'endroit du décollement (voir la figure 2). L'effet est nettement visible, mais, comme nous l'avons expérimenté en déroulant près de 25 mètres de ruban adhésif « Magic Tape » de la marque 3M, il faut une obscurité totale et attendre plusieurs minutes que les yeux se soient adaptés.

Harvey avait aussi remarqué qu'en séparant des lamelles de mica sous vide, les parois de verre de la cellule deviennent fluorescentes comme celles d'un tube à rayons X. Le physicien russe V. Karasev et ses collègues ont d'ailleurs confirmé



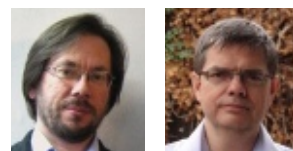
2. EN DÉROULANT DANS L'OBSCURITÉ complète un ruban adhésif, on peut distinguer une lumière bleutée émise de la zone de décollement. Si l'expérience est effectuée sous vide, on détecte l'émission de rayons X. Dans la région du décollage, des charges électriques se séparent. Il en résulte des champs électriques intenses, qui créent des microdécharges. Les électrons de ces décharges, accélérés par le champ électrique puis stoppés par la surface positive, émettent un rayonnement.

en 1953 cette émission de rayons X en étudiant le décollage d'un polymère d'une plaque de verre dans le vide.

Que se passe-t-il ? Tout d'abord, lorsque le ruban se décolle du rouleau, il se charge, comme on peut le vérifier en dévidant une vingtaine de centimètres de ruban : ce dernier est attiré par les surfaces les plus proches et attire de petits morceaux de papier, comme une règle de plastique frottée sur les cheveux. Ainsi, lors du décollage, on obtient une séparation de charges, négatives sur l'adhésif du ruban et positives sur le plastique du rouleau. Elles créent un champ électrique qui peut atteindre un million de volts par mètre lorsque les surfaces sont séparées de quelques dixièmes de millimètre.

Cependant, pour obtenir ce résultat, il importe de se placer dans un régime particulier de décollage, le « stick-slip » (collé-glissé). Dans ce régime, atteint à partir d'une certaine vitesse, le décollage n'est pas continu, mais se fait par saccades, d'où un bruit caractéristique. Les mécanismes qui créent des concentrations de charges, à l'origine des champs

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>

BIBLIOGRAPHIE

J. R. Hird *et al.*, A triboelectric X-ray source, *Applied Physics Letters*, vol. 98, 133501, 2011.

C. G. Camara *et al.*, Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape, *Nature*, vol. 455, pp. 1089-1092, 2008.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr





3. L'ÉMISSION DE RAYONS X
par effet triboélectrique va donner lieu à des émetteurs X compacts et portables, qui permettront de réaliser des radiographies ou des analyses chimiques sur le terrain.

électriques intenses, ne sont pas encore compris. Le spectre de rayonnement obtenu est très large, et va du visible jusqu'à des rayons X de 20 kiloélectronvolts et plus. Comme dans le tube de Coolidge, les rendements sont désastreux : un millionième seulement de la puissance mécanique fournie est récupérée sous forme de rayons X. Cette faible puissance lumineuse est tout de même suffisante pour radiographier une main !

Forts de ces résultats, les chercheurs américains ont poursuivi leurs travaux et créé une entreprise, *Tribogenics*, afin de développer une source utilisable reposant sur ce procédé. Leur nouvelle source, de la taille d'une clef USB, n'utilise plus un adhésif, mais un film de silicone qui est rapidement collé et décollé d'un substrat de résine époxy, à l'aide d'une cale piézo-

électrique. Un autre prototype en développement met en œuvre deux cylindres roulant l'un contre l'autre, sous vide. Il suffit d'un petit moteur alimenté par une batterie pour faire tourner ces cylindres et produire des rayons X.

L'objectif est de disposer de sources de rayons X portables, de la taille d'un téléphone portable ou plus petites, ne nécessitant pas de source de haute tension ni de mécanisme de refroidissement du métal chauffé par le faisceau intense d'électrons. On pourrait ainsi réaliser des radiographies sur le terrain [voir la figure 3], qu'il s'agisse de médecine ou de sécurité, avec un équipement complet tenant dans une mallette, ou encore d'y effectuer des analyses chimiques rapides et *in situ* à partir de la lumière caractéristique émise par les atomes après excitation par des rayons X. ■

universcience présente

les conférences

entrée libre

Les jeudis 17, 24, 31 janvier et 7, 14, 21 février à 19 h

théma **Les uns et les autres**

CYCLE "L'autre en nous"

Notre corps intègre des éléments étrangers : gènes provenant d'autres espèces, millions de bactéries en symbiose, fœtus chez la mère, organe d'un autre chez le greffé. Comment se redéfinit notre identité quand l'autre est en nous ?

Avec le soutien

SCIENCE VIE culture

programme complet sur www.universcience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Les odeurs blanches

Dans l'élaboration d'une odeur, évitons d'ajouter des composés nombreux en concentrations égales.

Hervé THIS

Les physiologistes de la vision savent que deux mélanges d'ondes lumineuses qui contiennent chacun des ensembles indépendants de nombreuses ondes produisent des « couleurs » indiscernables, dites blanches. Pour l'audition également, deux sons composés chacun de nombreuses ondes sonores de fréquences différentes sont indiscernables et donnent des « bruits blancs ». Ces sensations blanches naissent du mélange de stimulations indépendantes, qui couvrent tout le spectre perceptible, si elles sont d'intensités égales.

Le goût peut-il, de même, être blanc ? Les populations asiatiques auraient-elles eu raison de définir des saveurs « fades », parce qu'elles auraient été blanches ? Sans doute pas. D'abord, le goût est une sensation qui résulte de la stimulation de récepteurs de divers types (saveur, odeur, chaleur, consistance...). Ensuite la terminologie asiatique, comme d'ailleurs la terminologie européenne ancienne, mêlait des sensations d'ordres différents, confondant par exemple la saveur avec la perception tactile.

En revanche, Tali Weiss, Noam Sobel et leurs collègues à l'Institut Weizmann (Israël) ont cherché, pour les odeurs, à savoir s'il existerait des blancs olfactifs... et ils semblent les avoir identifiés (PNAS du 4 décembre 2012).

En physiologie olfactive, la mode scientifique, poussée par les avancées de la biologie moléculaire, est d'étudier les récepteurs et d'explorer la liaison d'un composé odorant particulier à un récepteur particulier. Toutefois les odeurs habituelles sont des mélanges de nombreux composés, et bien rares sont les

odeurs où un seul composé est majoritaire (avec toutefois des exceptions, comme la vanille ou la cannelle). Pour les odeurs plus ordinaires, le nez humain ne parvient que très difficilement à discerner les composés odorants des mélanges, même si, par ailleurs, il distingue des mélanges parfois très proches : pensons aux bouquets des vins !

En musique, l'étude des mélanges d'ondes sonores a montré des phénomènes remarquables : à partir d'une onde sonore de fréquence unique, l'ajout d'ondes supplémentaires ne laisse discerner la somme des fréquences que tant que le nombre d'ondes ajoutées est inférieur à six environ ; au-delà, on perçoit un son unique. Et quand les ondes sonores sont aléatoirement réparties en fréquence, avec des intensités égales, alors un bruit blanc, sorte de bruissement d'eau, apparaît.

Et en matière d'odeur ? Pour leur travail, les physiologistes israéliens ont sélectionné 68 composés aux odeurs aussi différentes que possible, et ils les ont dilués individuellement jusqu'à ce que les dilutions semblent d'intensités olfactives analogues. Puis ils ont préparé des mélanges de ces diverses solutions odorantes et demandé à des volontaires de noter la ressemblance de paires de mélanges.

T. Weiss et ses collègues ont constaté que, quand on augmente le nombre de composés odorants dans les mélanges, ces derniers se ressemblent de plus en plus, alors qu'ils n'ont pas la même composition. Avec environ 30 composés, la plupart des mélanges sentent la même chose.

Après avoir entraîné les sujets à reconnaître un mélange particulier de 30



composés, les expérimentateurs ont fait à nouveau sentir les mélanges ; les sujets ont cru reconnaître l'odeur d'autres mélanges, quand ils étaient composés de beaucoup de composés odorants, alors qu'ils distinguaient bien des mélanges contenant moins de composés. Les physiologistes israéliens concluent qu'il existe donc bien un « blanc olfactif ».

Au fait, quelle est son odeur ? Les descriptions données par des parfumeurs sont variables, sans doute parce que le blanc olfactif n'a pas une odeur particulière. En revanche, le blanc olfactif était noté plus plaisant – signe de comestibilité – que des mélanges où un composé odorant était prépondérant.

Cette dernière observation devrait guider les cuisiniers qui emploient des dilutions de composés odorants purs : pour faire des mélanges plaisants, mieux vaut utiliser moins de 30 composés et, surtout, apprendre à bien régler les concentrations des divers composés, en évitant qu'ils soient tous à la même valeur. Bref, comme en musique, comme en peinture, l'art culinaire doit apprendre à faire un premier plan et un arrière-plan. À quand la notion de perspective olfactive ? ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

