

nom de « problème *ein stein* » (une pierre en allemand, clin d'œil à Einstein).

En dimension 3, c'est possible, comme Peter Schmitt et John Conway l'ont montré assez facilement au début des années 1990 à l'aide d'un biprisme (voir la figure 6). Chaque couche est périodique, mais en choisissant bien l'angle créé entre les couches (angle déterminé par la forme du biprisme), l'ensemble du pavage de l'espace n'est pas périodique.

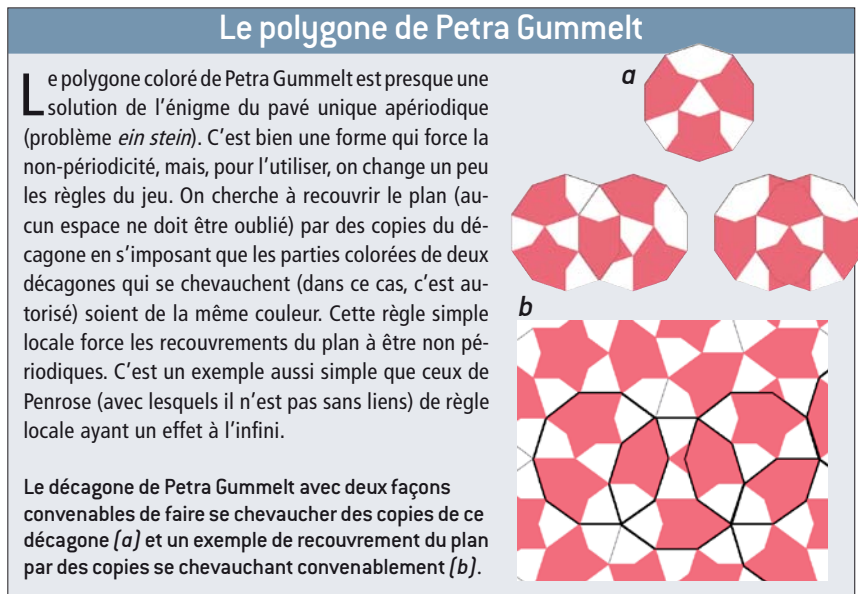
En dimension 2, le polygone coloré découvert en 1996 par l'Allemande Petra Gummelt, de l'Université de Greifswald, est une petite merveille assez proche de la solution : il s'agit d'un décagone régulier dont la surface est colorée avec deux couleurs (voir l'encadré ci-contre). On cherche à recouvrir le plan avec le décagone. On autorise les chevauchements, à condition que les parties chevauchantes soient colorées de la même façon, ce qui est une contrainte locale proche de la contrainte de recouvrement sans chevauchement.

Des solutions avec chevauchements

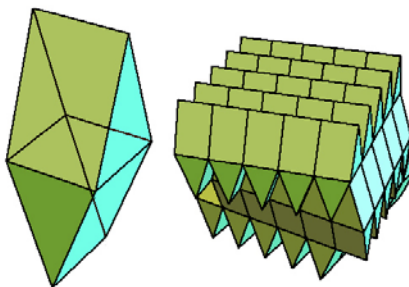
On montre que tout le plan peut ainsi être recouvert et qu'alors, c'est nécessairement de manière aperiodique. Des liens ont été établis entre ce décagone et les pavages de Penrose. De plus, ce décagone est d'une utilité directe pour comprendre certains quasi-cristaux. Malheureusement, les chevauchements autorisés interdisent qu'on le considère comme la solution attendue au problème *ein stein*.

En 2010, Joan Taylor, une habitante de la lointaine Tasmanie (île célèbre pour son loup disparu), après de longs essais s'étalant sur plusieurs années, mit au point un hexagone coloré et des règles locales pour paver le plan avec des copies de cet hexagone. Elle prouva que tout pavage qui respecte les règles est non périodique (voir l'encadré page ci-contre).

Le fait que les règles soient locales a laissé espérer un moment qu'on pourrait, comme pour les tuiles de Penrose, traduire les règles d'assemblage en déformant les côtés de l'hexagone pour obtenir un pavé unique (sans dessin, ni couleur) dont la seule



5. UNE TEXTURE FORMÉE avec des éléments disposés périodiquement (en haut) a un aspect peu naturel, contrairement à une disposition aperiodique (en bas).



6. POUR L'ESPACE À TROIS DIMENSIONS, Peter Schmitt et John Conway ont montré qu'avec un biprisme de forme bien choisie, on peut remplir tout l'espace, mais uniquement de façon aperiodique. L'analogie en deux dimensions existe-t-il ?

règle « recouvrir sans chevauchement ni espace vide » forcerait la non-périodicité. Personne n'a réussi cette traduction, que l'on considère maintenant impossible.

Les tentatives de traduction ont tout de même donné deux « quasi-solutions ». La première propose un pavé unique (sans dessin ni couleur) en plusieurs morceaux disjoints considérés comme liés rigidement comme par une force magique, qui pave le plan et ne le fait que de manière aperiodique. La seconde introduit une épaisseur (non constante) et donne une sorte de pavé tridimensionnel qui pave le plan uniquement de façon aperiodique. Ce succès remarquable laisse malheureusement un goût d'inachevé et l'on s'interroge aujourd'hui pour savoir si, en définitive, un « pavé pur » (sans dessin ni couleur) forçant la non-périodicité est possible. Une course est donc lancée entre ceux qui tentent encore de trouver un pavé unique aperiodique et ceux qui tentent de démontrer que ce pavé n'existe pas. ■

Aider la science et simuler le hasard

Une expérience est organisée par l'Algorithmic Nature Group qui réunit des chercheurs français (dont l'auteur de cette rubrique), espagnols, hollandais et mexicains. Le but est d'évaluer l'aptitude des humains à reconnaître et à simuler le hasard. Le

SciLogs

La nouvelle communauté de
blogueurs scientifiques francophones

Grâce à **SciLogs.fr**, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques... Pour vivre la science au quotidien !

Signal sur bruit

Richard Taillet
Astrophysicien,
professeur
chercheur
au LAPTh

Psycho Info

Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice
et à l'Université Internationale
Senghor, à Alexandrie,
en Égypte

Complexités

Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien,
et auteur de la rubrique
Logique et calcul
dans *Pour la Science*

Cerveau aux hormones

William Rostène
et *Jacques Epelbaum*
Neuroscientifiques,
directeurs de recherche
à l'Inserm

Best of Bestioles

Loïc Mangin
Rédacteur en chef
adjoint
Pour la Science

Retrouvez
aussi les autres
communautés
« SciLogs » : déjà
plus 140 blogueurs
scientifiques
à l'international !

Alterscience

Alexandre Moatti
Polytechnicien, chercheur
en histoire des sciences
au laboratoire SPHERE

Prospective Spatiale

Christophe Bonnal
Expert en astronautique,
président des commissions
« Débris spatiaux »
à l'IAA et l'IAF



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr !



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **SCIENCE** POUR LA

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur
à l'Université
de Lille
et chercheur
au Laboratoire
d'informatique fondamentale
de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

- J.-Y. Lee et R. Moody, Taylor-Socolar hexagonal tilings as model sets, *Symmetry*, vol. 5, pp. 1-46, 2013.
- J. Socolar et J. Taylor, Forcing non periodicity with a single tile, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 34(1), pp. 18-27, 2012.
- J. Socolar et J. Taylor, An aperiodic hexagonal tile, *J. Comb. Theory A*, vol. 118, pp. 2207-2231, 2011.
- J. Taylor, Aperiodicity of a functional monotile, 2010, www.math.uni-bielefeld.de/sfb701/preprints/view/420
- A. Musesti et M. Poalini, The Penrose Tessellation, 2010 [magnifique film sur les pavés apériodiques de Penrose]: <http://penrose.dmf.unicatt.it/>
- W. Steurer et S. Deloudi, *Crystallography of Quasicrystals*, Springer, 2009.
- B. Durand et al., Complex tilings, *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 73(2), pp. 593-613, 2008.

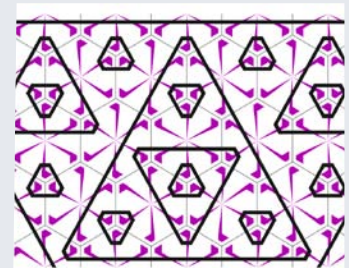
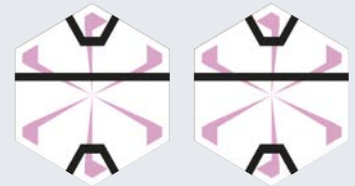
Le pavé de Joan Taylor

Le pavé de Taylor est une simple tuile hexagonale décorée. On peut la retourner, mais les motifs décoratifs sont les mêmes des deux côtés, comme si la tuile était en verre et les décorations incorporées dans le verre.

Les contraintes à respecter pour paver le plan sont les suivantes :

- les tuiles doivent être mises côté contre côté ;
- les traits noirs doivent se joindre ;
- lorsqu'on considère le côté d'un pavé quelconque, les deux dessins violets sur les tuiles dont le diamètre est aligné avec le côté doivent avoir des orientations identiques.

La démonstration que tout pavage respectant les règles précédemment édictées est apériodique se fait, comme pour les pavés de Robinson (voir le texte de l'article), en considérant les triangles de toutes tailles que dessinent les traits noirs sur les tuiles jointes.



test prend trois ou quatre minutes. Merci d'avance d'y participer (<http://complexitycalculator.com/hrng/>).

Si vous acceptez de donner une adresse électronique, une fois l'expérience terminée et les données recueillies interprétées, vous recevrez un message avec les résultats et un lien vers l'article scientifique qui en sera tiré.

À propos de la persistance des nombres

Yves Césari m'a fait parvenir la solution de plusieurs questions posées dans l'article sur la persistance des nombres (Pour la Science n° 429, juillet 2013). Il s'agit des conjectures concernant le nombre de cas où la suite tombe sur un point final donné. La première affirme que les seuls entiers dont le point final (dans le calcul de la suite persistante) est 1 sont les nombres repunit 1, 11, 111, ... Y. Césari propose les deux résultats suivants :

1) L'ensemble des nombres dont le chiffre des unités est 1, 3, 7 ou 9, et dont le chiffre des dizaines est pair, est stable par produit.

2) Les nombres obtenus par produits itérés de 3 et 7 ont pour chiffre des unités 1, 3, 7 ou 9, et un chiffre des dizaines pair.

Ces énoncés limitent l'inventaire et le dénombrement de tous les nombres qui ont



7. UN HOMMAGE À MARTIN GARDNER, réalisé par Bruce Torrence avec un pavage non périodique constitué de cerfs-volants et de fléchettes convenablement colorés. M. Gardner introduisit ces pavages dans sa rubrique de *Scientific American* en janvier 1977. Ce pavage par des fléchettes et des cerfs-volants a une symétrie d'ordre 5.

pour point final 1, 3, 7 ou 9, et conduisent à la solution des conjectures proposées au sujet des colonnes du tableau de la page 83.

Une autre solution pour le problème des repunits a été envoyée par Yves Lohmann. Marc Lapiere a aussi proposé un nombre qui, pour la version d'Erdős du problème de la persistance, n'atteint un point stable qu'après 21 étapes (au lieu de 18 pour le record cité dans l'article).

SCIENCE & FICTION

Le sexe chez les extraterrestres

Les extraterrestres existent – du moins dans la science-fiction ! –, mais comment ont-ils été conçus ? Puisque les informations sur cette question sont rares, il ne reste qu'à essayer de les déduire des mécanismes que l'évolution a sélectionnés... sur Terre.

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

Les histoires de science-fiction ne s'attardent pas souvent sur le sexe ou la reproduction des extraterrestres. Certaines œuvres évoquent pourtant des coups de foudre intergalactiques ou des kidnappings et des reproductions forcées. Comme souvent, les extraterrestres sont le reflet de nos peurs et de nos fantasmes. D'ailleurs, les hybrides entre humains et extraterrestres posent d'intéressantes questions sur la classification et l'évolution des espèces.

Si la reproduction de certains extraterrestres a été décrite en détail – par exemple, les cycles biologiques et les différents stades de croissance d'*Alien* –, ce n'est pas le cas de la plupart des autres personnages de science-fiction : même lorsque le troisième type est de forme humanoïde, très peu de détails concernent sa reproduction, qu'elle soit sexuée ou non.

Rappelons que sur Terre, le sexe n'est pas obligatoire pour perpétuer l'espèce : la plupart des organismes (les bactéries, des plantes, des champignons, mais aussi des vers plats ou annelés, etc.) se reproduisent par multiplication « végétative », c'est-à-dire par simple division cellulaire entraînant une duplication du patrimoine génétique porté par les chromosomes. Par rapport à la reproduction sexuée, ce type de reproduction paraît plus simple : il suffit d'un petit bourgeon ou d'un greffon. La multiplication végétative serait aussi plus efficace en termes de nombre de rejetons. En revanche, le brassage génétique est plus

limité, car les descendants ne sont que des clones de l'organisme initial. C'est aussi le cas de la parthénogenèse, où une unique femelle non fécondée – souvent nommée reine – donne naissance à des descendants (mâles ou femelles) tous identiques. Ce type de reproduction adopté par certaines plantes, insectes, ou lézards, est souvent à l'origine de sociétés matriarcales complexes.

Homme et femme à la fois

Qu'il s'agisse de parthénogenèse et de multiplication végétative, les clones sont souvent obtenus par voie naturelle. Lorsque le clonage devient artificiel, apparaissent les craintes que la méthode ne soit un jour appliquée aux humains à des fins eugéniques : dans l'épisode II de *Star Wars* (*L'Attaque des Clones*, George Lucas, 2002), les Kaminoans, créatures expertes des biotechnologies, fabriquent secrètement une armée de clones à partir des gènes d'un redoutable chasseur de primes. Plus proche de nous, *The Island* (Michael Bay, 2005) dépeint une société souterraine, aseptisée et prétendue idéale, composée d'humains clonés, conditionnés et « élevés » comme banques d'organes destinés aux riches vivant en surface.

Quand la reproduction est sexuée, elle n'est pas forcément binaire (mâle ou femelle), comme en témoignent de nombreux hermaphrodites sur Terre ; plantes à fleurs (avec leurs étamines – organes mâles – et



1. CAPITAINE SPOCK (au second plan à droite) est l'hybride de la science-fiction le plus connu. Ce serait un « vulcarrien ».



(c) 2013 Marc Boulay, marchoulay.fr, cossima-productions.com

2. LA REPRODUCTION ARTIFICIELLE évoquée dans diverses œuvres de science-fiction attise nos craintes, notamment celle de clones humains destinés à fournir des organes, ou celle de l'eugénisme, sélection des embryons sur des critères inacceptables.

leur pistil – organe femelle – sur le même pied), animaux terrestres (tel l'escargot) ou marins (le poisson clown commence sa vie comme mâle avant de devenir femelle). Ce poisson a-t-il inspiré John Varley pour son roman *Le Système Valentine* (2003), où un artiste original et génétiquement modifié change de sexe à volonté pour jouer seul *Roméo et Juliette* ? La rencontre du troisième type est aussi celle du troisième sexe dans *Sexomorphose* du Français Ayerdhal (1994), où Aimelin(e), humain capable de changer de sexe, part à la recherche de son identité.

Le sexe étant aussi organe de plaisir, certains auteurs n'hésitent pas à imaginer des scènes torrides entre humains et extraterrestres ! Philip José Farmer est l'un des pionniers de cette science-fiction « érotique » : dans *Les Amants étrangers* (1952) – nouvelle refusée par ses éditeurs et finalement adaptée en roman en 1961 –, l'auteur dépeint les liaisons dangereuses entre un homme fuyant une théocratie implantée sur Terre et une belle extraterrestre de forme humaine, mais de nature insectoïde. Avec ce plaidoyer pour le métissage intergalactique, Farmer utilise, en pleine Amérique puritaine, le sexe comme arme de critique sociale.

Ainsi la forme, le type, le nombre et l'utilisation des organes génitaux varient en fonction des mondes et des espèces : sur Terre, les « génitalias » des insectes sont tellement particuliers qu'ils servent à

identifier les espèces ! Sur les autres planètes, tout est permis à partir du moment où les tailles des organes sont compatibles.

Et quand, de ces liaisons intergalactiques, naissent des hybrides, ceux-ci jouissent de différents statuts : l'enfant stellaire, symbole de paix dans la série V (Kenneth Johnson, 1983-1985), est le fruit des amours d'une résistante humaine et d'un « lézard » venu de Sirius pour envahir la Terre. Mais l'hybride le plus célèbre de la science-fiction, et le plus adulé, reste Spock, de la série *Star Trek*, symbole du métissage interplanétaire et du respect d'autrui.

Un hybride fécond

De mère terrienne et de père vulcain, il pose d'intéressantes questions en termes de phylogénie et de classification des espèces : comment nommer Spock ? Il n'y a pas de règles en zoologie, bien que la tendance consiste à contracter les syllabes des noms des parents : ainsi le « zébrâne », issu de l'âne et du zèbre (tous deux appartenant au genre *Equus*), est un hybride naturel que Darwin lui-même a observé en Afrique australe. Précisons que le préfixe du nom hybride provient parfois du parent mâle : ainsi le tigrone est un croisement entre un tigre (*Panthera tigris*, originaire d'Asie) et d'une lionne (*Panthera leo*, originaire d'Afrique), tandis que le ligre est le rejeton d'un lion et d'une tigresse.

Ainsi Spock pourrait être un « vulcarien ». Notons aussi qu'il a eu un fils : c'est donc un hybride naturel fécond. Cela montre (du moins d'après la biologie terrienne classique) que les gènes des parents de cet hybride sont compatibles. Vulcains et Terriens appartiendraient donc, soit à la même espèce, soit au même genre. Supposons qu'*Homo sapiens* ait priorité sur l'espèce vulcaine. Tous les Vulcains, père de Spock compris, seraient donc des *Homo sapiens vulcanensis* (s'ils sont de la même espèce) ou des *Homo vulcanensis* (s'ils appartiennent au même genre). Reste à expliquer la présence du genre *Homo* sur la planète Vulcain... Les Vulcains seraient-ils des humains génétiquement modifiés, adaptés aux conditions de vie sur Vulcain ? À moins que nous ne soyons des Vulcains installés sur Terre ?

Cette dernière idée évoque l'hypothèse, plus sérieuse, de la panspermie, selon laquelle les premières formes de vie seraient apparues sur Terre à partir d'éléments extraterrestres, par exemple des acides aminés apportés de l'espace dans certaines météorites. ■

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

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr



ART & SCIENCE

Promenade dans un paysage... épigénétique

Lors du développement embryonnaire, le destin de chaque cellule est dicté à la fois par les gènes et par l'environnement. On peut représenter ces contraintes par un paysage de pics et de vallées où se déplace la cellule. Une vidéo a été réalisée pour illustrer cette métaphore.

Loïc MANGIN

EpiGeneSys est un réseau d'excellence qui regroupe 150 laboratoires de recherche à travers l'Europe. Financé par le 7^e programme cadre de la Communauté européenne, il a son siège à l'Institut Curie, à Paris. Son objectif est de bâtir un pont entre la recherche dans le domaine de l'épigénétique, la biologie des systèmes et le grand public. Mais qu'est-ce que l'épigénétique ? Elle correspond à la façon dont l'environnement et l'histoire individuelle influent sur l'expression des gènes. En d'autres termes, si l'ADN qui contient les gènes est un livre, l'épigénétique en est l'interprétation par la cellule.

Après une collaboration avec Geneviève Almouzni, directrice du Centre de recherche de l'Institut Curie, Paul Harrison, du Centre de recherches visuelles de l'Université de Dundee, en Écosse, est aujourd'hui en résidence artistique auprès de EpiGeneSys. Il s'intéresse aux méthodes de représentation des idées en biologie et, pour ce faire, développe des méthodes alternatives pour montrer et faire comprendre comment fonctionnent les êtres vivants.

Avec Mhairi Towler, de la société de production Vivomotion, également installée à l'Université de Dundee, et l'artiste Link Li, il s'est attelé au concept de « paysage épigénétique ». De quoi s'agit-il ? Lors du développement embryonnaire, les cellules se divisent et s'engagent progressivement dans des voies de différenciation : telle

cellule deviendra un neurone, telle autre un hépatocyte, une cellule musculaire, un globule blanc... À chaque type cellulaire correspond un profil d'expression des gènes. De fait, toutes les cellules disposent du même génome, mais, par exemple, seules les cellules *bêta* du pancréas fabriquent de l'insuline. Ce profil d'expression relève de l'épigénétique. En effet, grâce à des modifications chimiques de l'ADN lui-même et des protéines autour desquelles il s'enroule (les histones), certains gènes sont accessibles à la machinerie cellulaire de fabrication des protéines, tandis que d'autres, à l'inverse, sont dissimulés et enfouis.

Une cellule n'est donc pas complètement libre. Son devenir obéit à des contraintes imposées par les gènes, l'expression de ces derniers dépendant de l'environnement. Pour rendre compte de ces conditions, le biologiste britannique Conrad Hal Waddington (1905-1975), à qui l'on attribue la paternité du terme *épigénétique* dans son sens moderne, a développé une métaphore, celle du paysage épigénétique. Elle apparaît dans plusieurs de ses publications, dont *The strategy of the genes*. P. Harrison, M. Towler et L. Li se sont approprié cette idée et ont conçu une vidéo pour l'illustrer (voir la figure ci-contre).

Le paysage (*la nappe rayée en noir et blanc*) est un ensemble de « vallées » et de « montagnes » qui correspondent à l'expression ou non de certains gènes (*les picots noirs*). L'influence des modifications



épigénétiques d'un gène donné est illustrée par un fil qui, selon qu'il est tendu ou non, se traduit par une dépression ou un pic. Ces modifications exercent en quelque sorte une « force chimique » qui déforme le paysage (*la nappe est élastique*) en raccourcissant ou non les fils. Certaines agissent de concert (*a, les fils sont réunis en un nœud*), d'autres ont plusieurs effets (*b, plusieurs fils partent d'un même picot*).

La différenciation des cellules d'un organisme est ici représentée par des billes (*en*

rouge, bleu et vert) qui cheminent dans les vallées du paysage. Une bille ne peut que descendre vers son destin ! À chaque bifurcation, un choix est fait, dépendant des gènes et de l'environnement, engageant un peu plus irrémédiablement la cellule vers sa fonction finale. Waddington nommait *créodes* les chemins possibles, ce néologisme étant issu de deux termes grecs qui signifient « chemin nécessaire ».

Pour Waddington, le paysage épigénétique n'était qu'une image approximative que

l'on ne pouvait interpréter de façon rigoureuse. Ce n'est plus le cas. Plusieurs équipes ont su déterminer expérimentalement le paysage épigénétique d'une cellule (adipocyte, cellule musculaire...) et son évolution. La dynamique révélée correspond bien aux animations de P. Harrison. La métaphore n'en est plus tout à fait une. ■

La vidéo *The Epigenetic Landscape* est visible sur : www.vivomotion.co.uk/folio.html
Le site de *EpiGeneSys* : www.epigenesys.eu



Paul Harrison, Link Li et Mhairi Towler

IDÉES DE PHYSIQUE

Des gouttes bien calibrées

Les gouttes se détachant d'un compte-gouttes sont de taille uniforme, tout comme celles formées par un filet d'eau qui se fragmente. Pourquoi ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quand un robinet est mal fermé, les gouttes qui tombent une à une sont toutes identiques. Il en est de même pour celles qui se créent quand un filet d'eau se brise. Cette uniformité de taille est telle qu'elle permet un dosage précis de certains médicaments, administrés à l'aide d'un compte-gouttes. Elle ne repose pas sur le remplissage d'un récipient calibré, mais sur des phénomènes liés à la tension superficielle des liquides, c'est-à-dire à leur propension à prendre des formes dont la superficie est minimale.

Pour créer des gouttes de taille déterminée, il existe un outil simple et bien commode : le compte-gouttes. Lorsqu'on appuie doucement sur la poire qui surmonte le tube en verre, du liquide émerge et prend la forme d'une ampoule. Celle-ci s'allonge et se déforme à mesure qu'elle grossit,

jusqu'à se détacher en une goutte à peu près sphérique (voir la figure 1).

Que se passe-t-il ? Entre les molécules du liquide agissent des forces de cohésion. Il faut alors fournir de l'énergie pour amener des molécules du cœur du liquide à la surface, là où elles ont beaucoup moins de voisines, donc beaucoup moins de liens de cohésion. Cette propriété est quantifiée par la « tension superficielle », souvent notée γ (gamma), qui est l'énergie à fournir au fluide pour créer une unité de surface supplémentaire. Elle signifie aussi que l'on peut assimiler la surface du liquide à une mince pellicule élastique, qui doit être la moins étendue possible.

Lorsqu'on appuie sur la poire d'un compte-gouttes, on pousse du liquide hors du tube. Pourquoi le liquide ne tombe-t-il pas tout de suite ? Parce qu'il est retenu

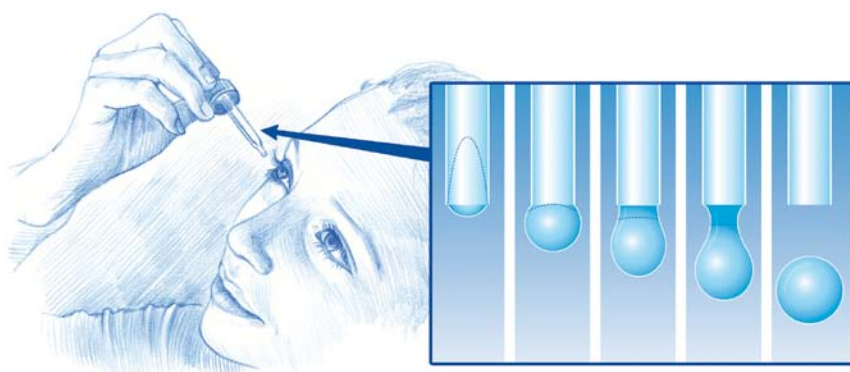
par la force capillaire exercée au niveau de la circonférence du tube. Cette force résulte de la tension superficielle [qui est de même dimension qu'une force par unité de longueur] et est égale à $2\pi r\gamma$, où r est le rayon du tube.

Force capillaire sur goutte pendante

À mesure que la goutte grossit, le volume de liquide augmente, mais pas la force capillaire. Lorsque le poids de liquide dépasse cette dernière, une goutte se détache et tombe – et son volume est déterminé, comme il se doit pour un compte-gouttes. Et si la goutte est assez petite, son poids ne suffit pas à la déformer : elle reste sphérique, forme qui présente une surface minimale pour un volume donné.

Avec un tube de un millimètre de rayon, on calcule, connaissant la valeur de la tension superficielle, que le volume d'une goutte d'eau qui tombe devrait être d'environ 50 millimètres cubes. Cependant, les considérations précédentes nécessitent des corrections. On constate en effet que la goutte pendante s'étire peu à peu et présente un col avec un rétrécissement important. Au moment de son détachement, une partie du liquide sorti hors du tube reste alors accrochée.

À toutes les étapes de sa croissance, la goutte a une forme parfaitement déterminée : celle qui réalise l'équilibre des pressions en tout point de sa surface. Quelles sont



1. UNE GOUTTE SE DÉTACHE d'un compte-gouttes quand le poids du liquide émergeant du tube devient supérieur à la force de capillarité qui la retient. Cette force de capillarité est égale au produit de la tension superficielle du liquide par la circonférence de l'orifice du tube.