

Jean-Michel Courty • Édouard Kierlik

La physique buissonnière

**Belin** POUR LA SCIENCE

À Cécile, Marie-Luce, Angelo,
Jean-Baptiste, Olivier et Florentin,
pour leur patience les semaines de bouclage.

Dans la même collection aux Éditions Belin-Pour la Science

- Jean-Paul DELAHAYE, *Mathématiques pour le plaisir. Un inventaire de curiosités*, 2010.
- Étienne GUYON, Alice PEDREGOSA et Béatrice SALVIAT (sous la direction de), *Matière et matériaux*, 2010.
- Lucas SALOMON, *Cerveau, drogues et dépendances*, 2010.
- Claude ALLÈGRE et René DARS, *La géologie. Passé, présent et avenir de la Terre*, 2009.
- Muriel GARGAUD, Hervé MARTIN, Purifacion LOPEZ-GARCIA, Thierry MONTMERLE et Robert PASCAL, *Le Soleil, la Terre... la vie. La quête des origines*, 2009.
- Yaël NAZÉ, *L'astronomie des Anciens*, 2009.
- Sébastien STEYER et Alain BÉNÉTEAU, *La Terre avant les dinosaures*, 2009.
- Bernard VALEUR, *Sons et lumière*, 2009.
- Nicolas GAUVRIT, *Vous avez dit hasard ? Entre mathématiques et psychologie*, 2009.
- Audouin DOLLFUS, *Les autres mondes*, 2008.
- Hans-Peter NOLLERT et Hanns RUDER, *Carnets de voyages relativistes. De la Terre vers un trou noir*, 2008.
- Patrick CORDIER et Hugues LEROUX, *Ce que disent les minéraux*, 2008.
- Yves CORBOZ, *Météorologie – 100 expériences pour comprendre les phénomènes météo*, 2008.
- Alain DORESSOUNDIRAM et Emmanuel LELOUCH, *Aux confins du Système solaire*, 2008.
- Hervé THIS, *De la science aux fourneaux*, 2007.
- Robert DELMAS, Serge CHAUZY et Jean-Marc VERSTRAETE, *Atmosphère, océan et climat*, 2007.
- Gilbert PIETRYK (sous la direction de), *Panorama de la physique*, 2007.
- Bernard FRANCOU et Christian VINCENT, *Les glaciers à l'épreuve du climat*, 2007.
- Cédric RAY et Jean-Claude POIZAT, *La physique par les objets quotidiens*, 2007.
- Adolphe NICOLAS, *Futur empoisonné – Quels défis ? Quels remèdes ?*, 2007.
- Jean-Paul DELAHAYE, *Complexités*, 2006.
- Denis SAVOIE, *Cosmographie – Comprendre les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes*, 2006.
- Louis BOYER, *Feu et flammes*, 2006.
- Marcel BOURNÉRIAS et Christian BOCK, *Le génie des végétaux*, 2006.
- François FORGET, François COSTARD et Philippe LOGNONNÉ, *La planète Mars – Histoire d'un autre monde*, 2^e édition, 2006.
- Alain NICOLAS, *Parcelles d'infini – Promenades au jardin d'Escher*, 2005.
- Bernard VALEUR, *Lumière et luminescence*, 2005.
- Étienne GUYON, Jean-Pierre HULIN et Luc PETIT, *Ce que disent les fluides – La science des écoulements en images*, 2005.
- Pierre CHAUVE, *Des grottes et des sources*, 2005.
- Yaël NAZÉ, *Les couleurs de l'Univers*, 2005.
- Thérèse ENCRENAZ et Fabienne CASOLI, *Planètes extrasolaires*, 2005.
- François MICHEL, *Roches et paysages*, 2005.
- Michel BLAY, *Les figures de l'arc-en-ciel*, 2005.
- Pierre CAUSERET, Jean-Luc FOUQUET et Liliane SARRAZIN-VILAS, *Le ciel à portée de main*, 2005.
- John KING, *Le monde fabuleux des plantes*, 2004.
- Jean-Paul DELAHAYE, *Les inattendus mathématiques*, 2004.
- Anny CAZENAVE et Didier MASSONNET, *La Terre vue de l'espace*, 2004.
- Jean LEFORT, *L'aventure cartographique*, 2004.
- Thérèse ENCRENAZ, *À la recherche de l'eau dans l'Univers*, 2004.
- Adolphe NICOLAS, *2050 Rendez-vous à risques*, 2004.

Consultez ces ouvrages et nos autres titres sur nos sites Internet :

www.pourlascience.fr

www.editions-belin.fr

Illustrations couverture et intérieur, sauf mention contraire : Bruno Vacaro

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE

La physique buissonnière

Illustrations de Bruno Vacaro

Jean-Michel Courty • Édouard Kierlik

Préface d'Étienne Guyon

Belin: POUR LA SCIENCE

8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
www.editions-belin.fr – www.pourlascience.fr

Préface	6
Bibliographie	156
Index	158



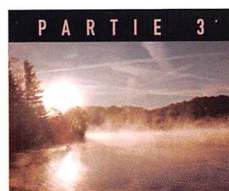
Bulles et cracs

.....	8
– Pastilles et soda : une rencontre explosive	10
– Craquements de doigts	14
– L'ivresse des bulles	18
– Crac végétal et uppercut de crevette	22
– Le pop-corn, c'est emballant	26



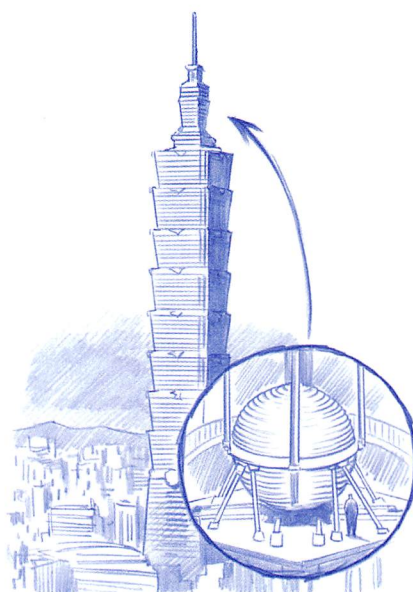
Est-ce bien solide ?

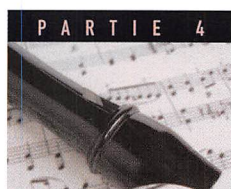
.....	30
– Pont de Tacoma : la contre-enquête	32
– Des tours qui chavirent	36
– Accéléromètres en mission	40
– Des chocs amortis... en toute sécurité	44
– Jeux de boules creuses ou pleines	48
– Une énergie à tout casser	52



Coup de froid ou coup de chaud ?

.....	56
– Vapeurs sous pression	58
– L'air comprimé revient	62
– Un verre de rosée ou de brouillard ?	66
– Les chauffeuses chimiques	70
– Quand le verre s'écoule	74
– Coup de froid sur le chaud	78
– Ni trop chaud ni trop froid	82





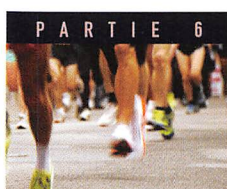
PARTIE 4 Trois petites notes de musique

.....	86
– Quand le son devient glaçant	88
– Bien reçu, bien entendu	92
– Sur un air de flûte	96
– Le profil des instruments à vent	100
– Le didgeridoo, un tuyau chantant	104



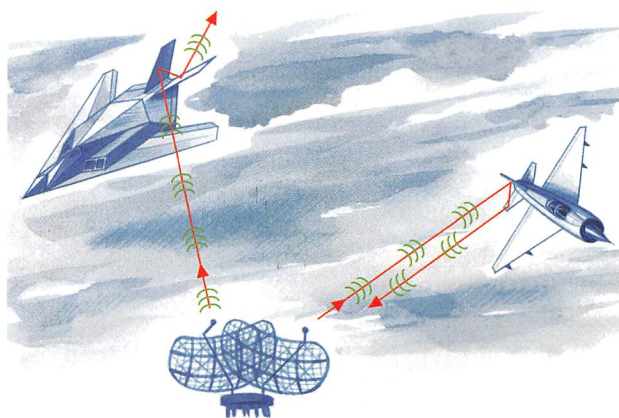
PARTIE 5 Du côté des ondes

.....	108
– Les retours de l'homme invisible	110
– Radio FM ou radio AM ?	114
– Les étiquettes électroniques	118
– À la chaleur des micro-ondes	122
– Des lignes à courant continu ou alternatif ?	126



PARTIE 6 Un peu de culture physique

.....	130
– Marcher comme un athlète	132
– Le trébuchet du footballeur	136
– Le vol de l'ovale	140
– Tirés par le vent	144
– Dans le sillage des navires	148
– Marcher sur l'eau ? Pas de lézard !	152



Il est aujourd'hui beaucoup question de *diversité*, qu'elle soit biologique, linguistique ou culturelle. Le livre de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik nous en présente un autre type : la diversité de la science qu'ils nous invitent à partager dans cette école buissonnière de la physique. Au fil de découvertes et de sujets très divers traités dans de courts articles autonomes, ils nous montrent l'extraordinaire variété des phénomènes physiques qui nous entourent. Nos deux auteurs font un large usage des outils auxquels leur formation et leurs métiers de professeurs de physique à l'Université leur ont donné accès (le sens de la mesure, les dimensions, l'ordre de grandeur, le raisonnement analogique). Mais pour eux, il ne s'agit pas d'une présentation académique ou d'un simple prolongement d'un programme de physique.

Les recours aux disciplines expérimentales sœurs y sont constants : la chimie, bien sûr, et la mécanique, deux domaines que je préfère, pour ma part, inclure dans le grand chapeau des « sciences physiques ». Mais de nombreux thèmes concernent aussi les sciences de la nature et de la vie. Enfin, à travers les applications qui sont souvent présentes comme les sources d'inspiration des thèmes retenus, ou, au contraire, comme prolongement d'expériences de base, la technologie est bien présente.

Les 34 sujets de ce livre sont tirés de leur rubrique « Idées de physique » que publie mensuellement la revue *Pour la Science* et où je découvre chaque mois avec curiosité et plaisir la nouvelle trouvaille et son analyse. Il s'agit du troisième volume d'une série de tels ouvrages, le premier *Les lois du monde. Notre environnement expliqué par la physique* ayant été cosigné avec Roland Lehoucq qui avait fondé et tenu cette rubrique jusqu'en 2001 avant que le relais ne soit pris par J.-M. Courty et É. Kierlik. Et si les sujets ont été regroupés en six parties, les textes qui composent chacune d'elles sont aussi très divers, tant par leurs thèmes que par les outils utilisés pour traiter chaque problème.

Et ce cocktail est pour moi à chaque fois comme un bel exercice de style d'une démarche du physicien. Il peut être, à ce propos, utile de rappeler ce que dit le physicien prix Nobel de physique, Claude Cohen-Tannoudji dans la préface du deuxième volume *Le monde a ses raisons. La physique au cœur du quotidien* : « Il n'y a pas de petite physique et de grande physique et les auteurs ne font aucune exclusive... » Que l'on soit du type orfèvre (Cl. Cohen-Tannoudji) ou plombier (votre serviteur), nous nous reconnaissons dans une même communauté dont les deux auteurs sont des membres très actifs.

La remise du prestigieux prix Jean Perrin 2008 de la Société française de physique a été pour J.-M. Courty et É. Kierlik l'occasion se dévoiler et de livrer quelques indications sur la recette de leur production mensuelle. Tout d'abord trouver des thèmes nouveaux : la recherche – cette promenade buissonnière – part d'une traque diffuse d'idées attrapées à l'occasion de lectures, de séminaires ou à l'aide de collègues – véritables indices de science. La deuxième phase, la recherche d'analyses et de références autant que l'interprétation – souvent délicate – qu'ils vont tirer est un temps de dialogues, voire de frictions, entre les deux auteurs. Car il s'agit bien souvent de présenter des thèmes actifs et

ouverts où l'on rencontre souvent des effets inattendus. La conclusion peut alors contenir sa part d'ignorance qui permettra de lancer de nouvelles questions d'une science en marche. Enfin, il faut tenir compte des contraintes éditoriales, et du dialogue, parfois tendu (j'en sais quelque chose), mais fécond, avec la rédaction pour conduire à un produit fini, plus lissé. Il faut aussi souligner la part, déterminante à mon sens de l'illustration, assurée avec humour et intelligence depuis le début de cette rubrique par Bruno Vacaro, un acteur essentiel de la médiation.

Ce qui caractérise le plus souvent ces articles est le *paradoxe*, celui qui éveille une curiosité endormie et qui oblige à réfléchir ou remettre en cause ses idées. En voici quelques exemples : dans *Bulles et cracs*, nous sommes invités à une explosion de *Coca Cola* lorsqu'on lui ajoute un bonbon *Mentos* et dont on a pu voir de nombreuses illustrations sur la Toile depuis deux ans ; pourquoi un tel mélange particulier ? Dans *Est-ce bien solide ?*, toutes sortes de couplages et de non-linéarités conduisent aussi à des comportements inattendus ou brutaux : le pont de Tacoma mal conçu montrait à l'usage de fortes oscillations, mais pourquoi s'est-il effondré sous un vent modéré et pourquoi sous la forme d'une torsion de son tablier et non pas d'une simple flexion ?

Dans *Coup de froid ou coup de chaud ?*, nous sommes invités à analyser ce fameux effet Mpemba, découvert par un jeune étudiant tanzanien, qui montre que l'eau chaude introduite dans un congélateur gèle plus vite que l'eau froide (je continue à ne pas me faire une idée dans les interprétations ouvertes proposées... et l'expérimentation même me résiste). Si *Trois petites notes de musique* nous invitent à comprendre l'acoustique physique classique des instruments, elles nous parlent aussi du didgeridoo des aborigènes australiens. *Du côté des ondes* est une ouverture vers l'électromagnétisme et vers des applications de tous les jours de l'électricité. Enfin, *Un peu de culture physique* analyse le comportement en vol du ballon ovale alors que l'essentiel de la littérature ne concerne que le ballon rond. Il nous dira aussi comment on peut courir sur l'eau... à condition d'être un insecte ou un lézard vélocé !

On le voit, la physique est bien présente, mais elle est associée à de nombreuses manifestations de notre environnement tout à fait hors des schémas disciplinaires classiques. Si ce livre doit intéresser un grand public curieux, il peut aussi être, avec les deux volumes précédents, un centre de ressources pour l'enseignement et, bien sûr pour la recherche, par les problèmes ouverts qui accompagnent toutes ces présentations.

Décloisonner l'enseignement des sciences est aujourd'hui une nécessité. Les ouvrages tels que *La physique buissonnière* sont à la croisée des chemins scientifiques. Bonne chance à ce bel ouvrage de curiosité et de vagabondage en sciences. Je suis convaincu qu'il aura des successeurs au travers des rendez-vous que nous donnent chaque mois les auteurs.

Étienne Guyon,
Directeur honoraire de l'École normale supérieure



Bulles et cracs



Des feuilles d'une dionée
aux plongeurs sous-marins
en passant par les geysers de soda
et le pop-corn.

Shutterstock / D. Iwazko

Une dionée dont les feuilles, d'un « clac »,
emprisonnent les insectes.

Pastilles et soda, une rencontre explosive



www.eepybird.com

Pourquoi le *Coca-Cola* et les bonbons *Mentos* ne font-ils pas bon ménage ? La réponse se trouve dans les mécanismes de la formation des bulles.

Une expérience menée par Fritz Grobe et Stephen Voltz aux États-Unis.

Depuis 1999, de nombreuses vidéos diffusées sur Internet mettent en scène une spectaculaire expérience : en lâchant des bonbons *Mentos* dans une bouteille de *Coca-Cola light*, il se crée une effervescence telle que le soda jaillit du goulot jusqu'à plus de trois mètres de hauteur. De cet inattendu geyser en bouteille, la physicienne américaine Tonya Coffey, avec l'aide de ses étudiants, a déterminé quelques ingrédients essentiels.

Quand le champagne déborde...

Le premier élément de l'explication est la présence de dioxyde de carbone, ou CO_2 . Dans les sodas, les eaux gazeuses ou le champagne, cette substance est dissoute sous pression dans le liquide. Plus la pression est élevée, plus la quantité dissoute est importante. Une bouteille de champagne de 0,75 litre, sous une pression d'environ six atmosphères, contient ainsi quelque neuf grammes de CO_2 ; le *Coca-Cola* d'une bouteille de deux litres, à quatre atmosphères de pression, contient 16 grammes de CO_2 , soit près de huit litres de gaz à pression ambiante.

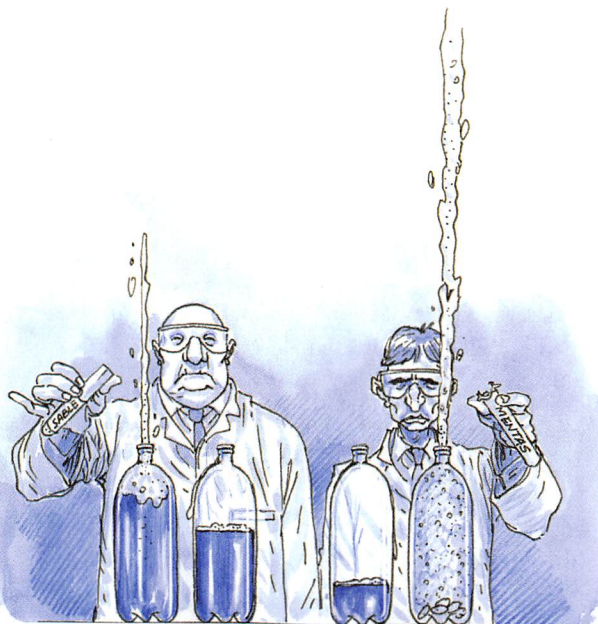
Que se passe-t-il quand on ouvre une bouteille de soda ? La pression à l'intérieur chute brutalement, jusqu'à égaliser la pression atmosphérique. Le CO_2 se retrouve en excès dans le liquide et est libéré par de petites bulles qui viennent crever en surface : c'est l'effervescence. Ce dégazage est cependant assez lent et dure plusieurs minutes. En effet, la formation de bulles au sein du liquide est difficile ; si, à sa naissance, la bulle n'atteint pas une taille minimale, elle se réduit jusqu'à disparaître. Pourquoi ?



1 En secouant une bouteille de champagne, on crée un jet bien moins puissant que celui obtenu en plongeant des bonbons *Mentos* dans une bouteille de *Coca-Cola light*.

Deux phénomènes entrent en compétition. D'une part, les molécules de CO_2 en excès dans la solution liquide traversent la surface de la bulle pour se retrouver en phase gazeuse, ce qui fait grossir la bulle. D'autre part, l'interface liquide-gaz se comporte comme une pellicule élastique tendue qui cherche à se contracter, c'est-à-dire à réduire la taille de la bulle. Et ce d'autant plus que le rayon de la bulle est petit et que la «tension superficielle», qui mesure l'élasticité de l'interface, est élevée. Les deux contributions s'équilibrent pour une certaine taille dite critique. Si la bulle est plus grosse, le flux de CO_2 l'emporte sur l'effet de la tension superficielle et la bulle continue de grossir. Au contraire, si la bulle est plus petite, elle s'effondre sur elle-même et disparaît.

Au sein du liquide, les bulles naissent spontanément sous l'effet des fluctuations thermiques, mais rares sont celles qui atteignent la taille critique. On peut toutefois aider la formation des bulles en agitant la bouteille encore bouchée. Le mouvement turbulent mélange le liquide et le gaz présent au sommet de la bouteille. Cela crée de nombreuses



2 Le versement de sable dans du soda donne aussi lieu à une effervescence, mais bien plus modeste qu'avec des pastilles: la quantité de liquide éjectée (Q_1) est réduite de moitié environ (par rapport à Q_2).

microbulles. Si on ouvre la bouteille ou la canette sans trop attendre (les bulles trop petites finiraient par disparaître et les bulles plus grosses auraient le temps de remonter à la surface du liquide), toutes ces bulles grossissent en même temps, d'où une effervescence assez violente pour provoquer le débordement et arroser les alentours!

Faciliter la formation des bulles

Dans les boissons gazeuses, un autre mécanisme facilite la formation des bulles. Ces petites poches de gaz naissent autour de minuscules impuretés ou sur les anfractuosités microscopiques des surfaces solides. De telles imperfections constituent des sites de nucléation, où les bulles formées sont stables même en deçà de la taille critique. Ainsi, lorsqu'on ouvre sans l'agiter une bouteille d'eau gazeuse, on peut constater que les bulles naissent souvent sur les parois ou au fond de la bouteille, là où se concentrent les impuretés. En essuyant une coupe de champagne avec du tissu qui peluche un peu ou du papier essuie-tout, des fibres de cellulose se déposent, ce qui favorise l'apparition de trains de bulles qui remontent à partir de ces sites de nucléation.

Ces éléments suffisent-ils à expliquer l'étonnante effervescence créée en immergeant des bonbons *Mentos* dans du *Coca-Cola*? N'y a-t-il pas des aspects purement chimiques? Le travail des étudiants de T. Coffey a éclairé cette question. La bouteille de *Coca-Cola* n'étant pas agitée, l'effervescence ne peut provenir que de l'ajout de nouveaux sites de nucléation à ceux déjà présents. Sous cet aspect, le *Mentos* n'est pas singulier, puisqu'on obtient des effets importants avec d'autres bonbons mentholés, du sel de table, du sable, des charbons actifs... Les résultats sont comparables en termes de masse éjectée de la bouteille: entre la moitié et les trois quarts du contenu sont expulsés.

En revanche, les bonbons *Mentos* l'emportent de loin en termes de puissance d'éjection. L'avantage premier d'une telle pastille est sa densité, qui l'entraîne rapidement vers le fond. Les bulles de gaz qui se forment à sa surface naissent donc au fond de la bouteille et ont le temps de grossir en



3 Avec des pastilles broyées, on réduit paradoxalement l'effervescence, malgré l'augmentation de la surface de contact avec le liquide: contrairement aux pastilles, les débris solides ne tombent pas jusqu'au fond.

remontant. Elles entraînent ainsi beaucoup plus de liquide que celles nées à proximité de la surface. On en a une démonstration en broyant le bonbon *Mentos*. Réduit en petits morceaux, sa surface de contact avec le liquide est augmentée, ce qui devrait multiplier les bulles. Mais le *Mentos* broyé tombe moins vite au fond – il est notamment gêné par la formation des bulles à sa surface, un peu comme le cachet d'aspirine qui flotte grâce à l'effervescence – et la portée de la projection de liquide est inférieure. Il en est de même pour le sable et le sel.

Un autre élément décisif est l'énergie nécessaire à la formation de bulles de taille suffisante. Plus elle est élevée, moins il y aura de bulles, et cette dépendance est exponentielle. Une petite diminution en énergie a alors des effets notables. Pour ce faire, on peut abaisser la tension superficielle, comme le font les tensioactifs dans les détergents. L'équipe de T. Coffey a ainsi identifié l'aspartame et le benzoate de potassium dans le soda, et la gomme arabique et la gélatine dans le bonbon : ces substances abaissent l'énergie de formation des bulles. La caféine semble peu importante (on a des résultats équivalents avec du *Coca-Cola* décaféiné) ; au contraire, l'aspartame est un peu plus efficace que le sucre usuel. Pour épater vos amis, prenez bien du *Coca-Cola light* !

Malgré l'étude américaine, de nombreuses zones d'ombre subsistent. Pourquoi d'autres bonbons mentholés ne sont-ils pas aussi efficaces que le *Mentos* ? La rugosité du solide ajouté est-elle cruciale ? Aurait-on des effets équivalents avec de l'eau de Seltz de même teneur en CO_2 ? Le chimiste français Pierre Aldebert a ouvert d'autres pistes avec des expériences réalisées en 2006. Il suggère en particulier qu'outre le phénomène de dégazage du liquide, une modification rapide de l'état de surface de la pastille favoriserait l'adsorption massive de dioxyde de carbone et accélérerait ainsi considérablement la libération du gaz. Le débat n'est donc pas clos, pour le plus grand plaisir des amateurs. Avez-vous déjà mis des pastilles *Vichy* dans du *Dom Pérignon* ?

Craquements de doigts



Droits réservés

Pourquoi entend-on un « crac ! »
lorsqu'on tire sur une articulation ?
À peu près pour la même raison que
l'ouverture d'une canette de soda
s'accompagne d'un « pschitt ».

Vous l'avez tous fait un jour : tirez sur les doigts, et vous entendez des craquements. Quelle est la cause de ces bruits intrigants ? Des études récentes, appuyées par des radiographies, ont confirmé ce que certains ont avancé dès les années 1970 : les craquements sonores sont dus à la formation de bulles au niveau des articulations. Des bulles ? Quelles bulles ? Et pourquoi des bulles se forment-elles donc ?

Des bulles dans l'articulation...

Revenons tout d'abord sur la morphologie de nos articulations. Afin de faciliter le mouvement entre les os, leur contact est assuré par plusieurs intermédiaires. L'extrémité des os est protégée par du cartilage, matériau solide et élastique qui résiste aussi bien à la compression qu'à la traction. La lubrification est assurée par une mince couche d'un liquide physiologique, la synovie, que la poche synoviale maintient en place entre les cartilages.

Si l'on force l'articulation à se distendre en tirant sur les os, la pression chute considérablement dans la synovie et atteint même des valeurs négatives de -2 atmosphères ! Il se produit alors de la cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles de gaz. C'est l'expansion rapide de ces bulles – dont le diamètre peut atteindre $0,5$ millimètre – qui est responsable du bruit entendu.

D'où proviennent ces bulles ? Pour le comprendre, observons ce qui se passe lorsqu'on ouvre une bouteille de boisson gazeuse. On entend un « pschitt », signe que de l'air s'échappe. À l'intérieur de la bouteille, la pression chute pour revenir à la pression

atmosphérique. Simultanément, des bulles apparaissent dans la boisson. La nature de ces bulles est bien connue : il s'agit de dioxyde de carbone (gaz carbonique), auparavant dissous. Comme l'a découvert le physicien britannique Williams Henry en 1803, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz sur le liquide.

On comprend facilement cette loi en termes microscopiques. La pression qu'exerce un gaz sur une surface est la traduction des innombrables collisions des molécules du gaz avec cette dernière. Lorsqu'il s'agit de la surface d'un liquide, la plupart des molécules rebondissent, mais une fraction d'entre elles se lie à l'interface et passent éventuellement en solution. Réciproquement, parmi les molécules de gaz dissous qui s'approchent de l'interface, certaines, au hasard de collisions favorables, acquièrent assez d'énergie pour s'échapper et retrouver l'état gazeux. Le taux d'échappement est proportionnel à la concentration du gaz dissous, tandis que le passage en solution est proportionnel à la densité de molécules dans la phase gazeuse, donc à la pression du gaz. Il s'ensuit qu'à l'équilibre, la concentration du gaz en solution est proportionnelle à la pression partielle du gaz (la part de pression due au seul gaz considéré, puisque l'air est un mélange de gaz).



1 À l'ouverture d'une bouteille de soda, la pression sur le liquide diminue et de nombreuses bulles de dioxyde de carbone naissent, d'où le « pschitt ». Si l'on rebouche ensuite le récipient en y augmentant la pression avec une pompe, on empêche les

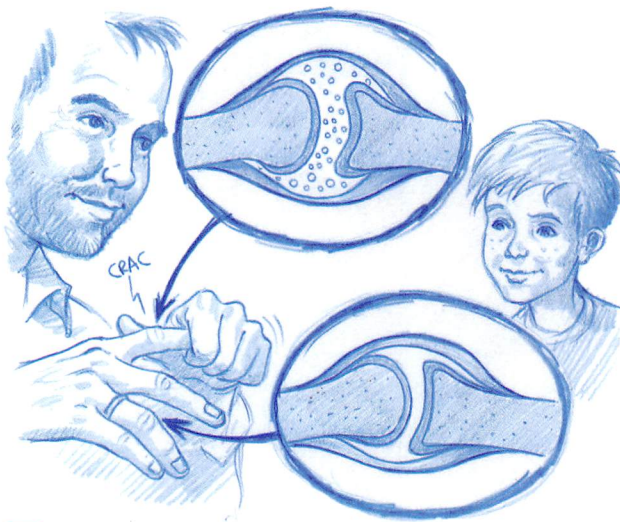
bulles de se former. Mais la pression partielle de dioxyde de carbone dans l'air au-dessus du liquide étant bien plus faible qu'avant l'ouverture, le gaz continue à s'échapper du liquide par diffusion. Le procédé ne fait que ralentir le dégazage.

...et dans la bouteille

Nous faisons l'expérience quotidienne de cette loi grâce aux bouteilles d'eaux minérales et de soda, et plus rarement (hélas!) de champagne. La pression du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est d'environ 360 microatmosphères. Ce gaz soluble se retrouve dans toutes les eaux en contact avec l'atmosphère à raison de 0,5 milligramme par litre, à 20 °C. Si sa concentration atteint cinq à huit grammes par litre dans la plupart des sodas, c'est que ces boissons sont préparées sous une pression équivalente à quatre atmosphères de dioxyde de carbone pur. Aussi, lorsqu'on ouvre une bouteille de soda, elle perd peu à peu tout son gaz; une boisson de 33 centilitres libère ainsi environ un litre de dioxyde de carbone.

Comment éviter que la boisson ne perde sa pétillance? Une seule solution: reboucher hermétiquement la bouteille afin que la pression du dioxyde de carbone situé au-dessus du fluide augmente. Des inventeurs ont même cru trouver mieux: un bouchon hermétique muni d'une petite pompe, qui permet de mettre rapidement sous pression le contenu de la bouteille. Malheureusement, ce qui compte n'est pas la pression totale dans le récipient, mais seulement la pression due au dioxyde de carbone. L'apport du dioxyde de carbone atmosphérique étant très faible, cela ne change pas la quantité de dioxyde de carbone qui quittera la boisson. Le seul effet probant est de ralentir la formation des bulles, et le résultat final est le même qu'avec un simple bouchon hermétique.

Synovie m'était contée...



2 Lorsqu'on tire sur un doigt, le volume de l'articulation augmente de quelque 20 pour cent. En conséquence, la pression au sein de la synovie, contenue dans la poche synoviale, diminue beaucoup; elle atteint même des valeurs négatives. Les gaz dissous dans ce liquide lubrificateur forment alors des bulles dont le diamètre peut atteindre 0,5 millimètre de diamètre. Le craquement que l'on entend est dû à l'expansion rapide de ces bulles et aux vibrations que cela provoque.

Nous pouvons maintenant comprendre ce qui se passe dans nos articulations. La synovie contient une part importante de gaz dissous, les quatre cinquièmes étant du dioxyde de carbone. Lorsqu'on réduit la pression, ce gaz ne peut rester en solution et revient à l'état gazeux. Pour créer des bulles au sein du fluide, il faut que la pression soit très faible. Toutefois, une fois que quelques bulles sont créées, elles grossissent très rapidement. Cela produit dans le fluide des vibrations, responsables du craquement que nous entendons.

Le gaz libéré accroît le volume de l'articulation de près de 20 pour cent, ce qui diminue les contraintes mécaniques exercées. Une fois les bulles formées et le doigt relâché, il n'est pas possible de refaire craquer l'articulation immédiatement: il faut attendre que le gaz se dissolve de nouveau.

Est-il déconseillé de faire craquer les doigts? L'énergie libérée à chaque craquement est de l'ordre de 0,1 millijoule par millimètre cube, soit dix fois moins que les valeurs



3 L'extraction des gaz dissous dans l'eau à l'aide d'un cylindre où l'eau est en rotation rapide permettrait-elle aux plongeurs de respirer ? Le long de l'axe du cylindre, où la vitesse de rotation est nulle, la pression de l'eau est

abaissée, ce qui permet aux gaz dissous de former des bulles. Un plongeur qui récupérerait ce gaz pourrait respirer – à condition de traiter environ 300 litres d'eau de mer par minute, ce qui est considérable.

susceptibles d'endommager le cartilage. Il semble donc que faire craquer les doigts n'ait pas de conséquences à terme sur les articulations. Le consensus n'est pas complet, mais, d'après des études médicales portant sur un grand nombre de personnes, il n'y aurait pas de lien entre craquement des doigts et apparition de rhumatismes.

Le moyen de respirer dans l'eau ?

Créer des bulles en réduisant la pression pourrait avoir d'intéressantes applications. Alon Bodner, un inventeur israélien, a récemment conçu un procédé pour respirer sous l'eau en utilisant l'oxygène dissous dans l'eau de mer. À la pression atmosphérique, un litre d'eau de mer contient huit milligrammes d'oxygène. Sachant qu'un nageur a besoin de l'ordre de deux litres d'oxygène par minute, soit 2,6 grammes, il faut traiter environ 300 litres d'eau de mer par minute. L'idée d'A. Bodner est de simplement centrifuger l'eau dans un cylindre. Il apparaît alors des basses pressions au niveau de l'axe : les gaz dissous y sont libérés puis récupérés. Avec un cylindre de dix centimètres de rayon, des vitesses de rotation de 1500 tours par minute suffisent pour abaisser la pression de une atmosphère. Cette technique semble insuffisante pour approvisionner des plongeurs individuels. Mais elle pourrait convenir à des installations sous-marines.



Shutterstock / Konstantin Karchevsky

L'ivresse des bulles

Si vous voyez une grosse bulle d'air s'élever en ligne droite dans l'eau, c'est probablement parce que vous avez bu un autre liquide.



Léonard de Vinci, dans son codex *Leicester*, note que, contrairement à des cailloux qui tombent verticalement dans l'eau, les bulles d'air remontent vers la surface en zigzaguant ou en décrivant une hélice (*voir la figure 1*). Bizarre ! À première vue, le bilan des forces en présence indiquerait que la descente d'un corps plus dense que l'eau et l'ascension d'un corps plus léger sont, au sens près, de nature identique. La résolution de ce paradoxe n'est pas si simple : il a fallu attendre les années 1990...

Quelles forces s'exercent-elles sur une bulle en mouvement dans l'eau ? Outre le poids, tout à fait insignifiant pour une bulle d'air, on en voit *a priori* deux : la poussée d'Archimède, dirigée vers le haut et égale au poids de l'eau contenue dans un volume identique à celui de la bulle, et la force de frottement fluide, opposée au mouvement. On s'attend ainsi à ce que, après une phase d'accélération, la bulle suive une ascension rectiligne à vitesse constante, vitesse pour laquelle le frottement compense la poussée.

C'est effectivement le cas des petites bulles : une bulle d'un demi-millimètre de diamètre s'élève verticalement d'environ cinq centimètres par seconde. Mais si la bulle dépasse quelque 1,3 millimètre de diamètre, elle se met à se mouvoir aussi dans le plan horizontal, d'où les zigzags et les hélices. Pourquoi ?

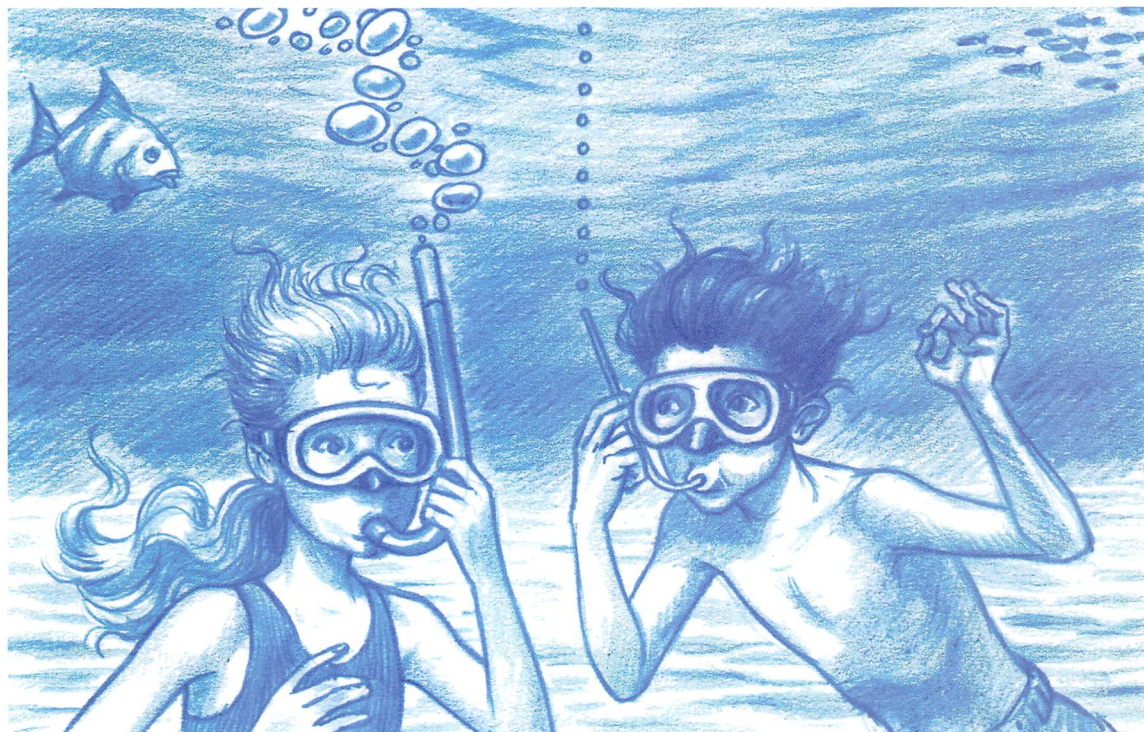
Dans le passé, des scientifiques avaient invoqué le fait que les bulles ne sont pas tout à fait rondes : elles s'aplatissent dans la direction du mouvement. Las ! Des sphères en plastique, moins denses que l'eau, mais indéformables, oscillent elles aussi horizontalement et montent en virevoltant. La clef de l'énigme, trouvée grâce aux progrès des techniques de visualisation ou de simulation des écoulements, réside dans le sillage des bulles.

Déviées par leurs tourbillons

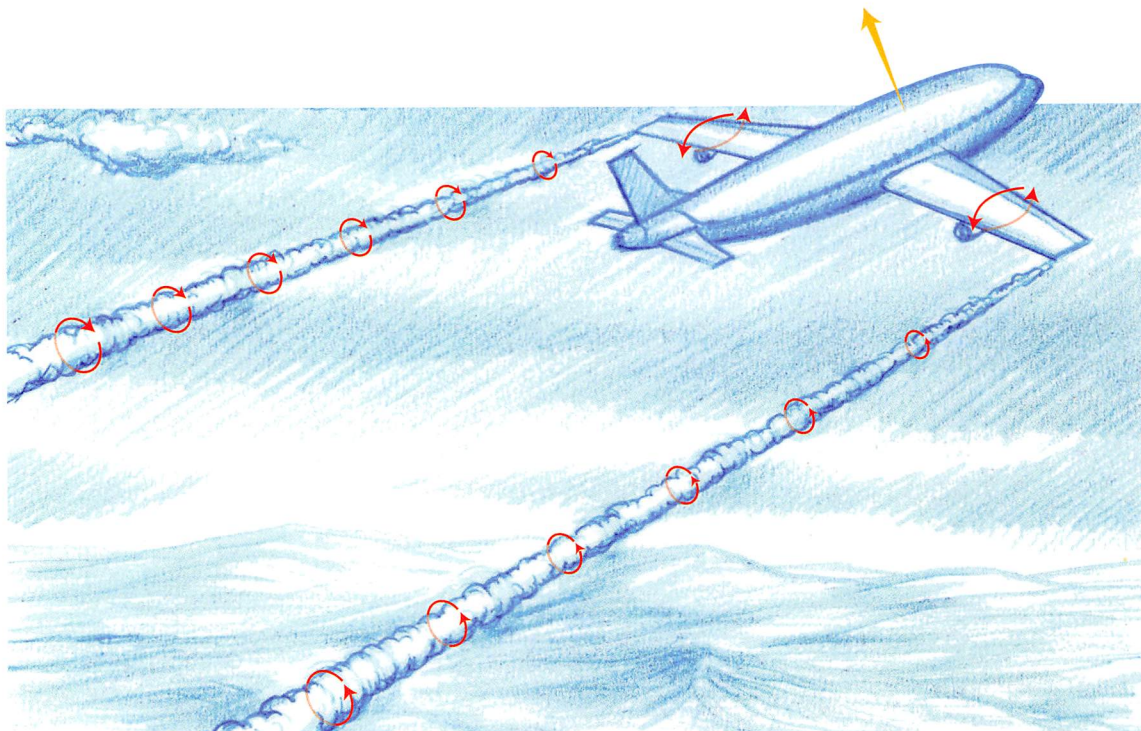
Pour de petits diamètres de bulle, point de surprise : les filets d'eau s'écartent pour laisser passer la bulle et se referment derrière elle, laissant un sillage régulier et rectiligne. Pour des bulles plus grosses, en revanche, il apparaît deux lignes de sillage autour desquelles l'eau tourne dans des sens contraires. Par leur forme et leur disposition, ces deux lignes de tourbillons sont identiques à celles qui naissent aux extrémités des ailes d'un avion en vol, et dont nous connaissons tous la signature : deux traînées blanches de cristaux de glace, formées par la condensation de la vapeur d'eau dans les régions de basse pression (donc froides) associées aux tourbillons.

L'existence des deux lignes de tourbillons d'un avion est bien comprise. L'engin en vol dévie l'air vers le bas par le bord de fuite de l'aile ; il s'ensuit, par réaction, une force de portance dirigée vers le haut. Or l'écoulement de l'air au voisinage de l'aile équivaut à la superposition d'un écoulement uniforme et d'une circulation autour de l'aile, l'air s'élevant au niveau du bord d'attaque pour passer au-dessus de l'aile et redescendant vers le bas à l'arrière de celle-ci. En d'autres termes, l'aile tire sa portance d'un tourbillon qui l'entoure.

Ce tourbillon se prolonge jusqu'au bout des ailes. Au-delà, le tourbillon, d'axe perpendiculaire à la direction du vol, n'a plus d'aile pour l'entraîner. Il se tord alors vers



1 Les petites bulles remontent en ligne droite. Les grosses ont un mouvement plus capricieux : elles s'élèvent en zigzaguant, en raison de forces latérales créées par l'écoulement tourbillonnaire de l'eau autour de la bulle. Ces tourbillons gagnent en importance avec la taille de la bulle.



l'arrière et engendre, aux deux extrémités des ailes, un sillage d'axe parallèle au mouvement de l'avion (*voir la figure 2*).

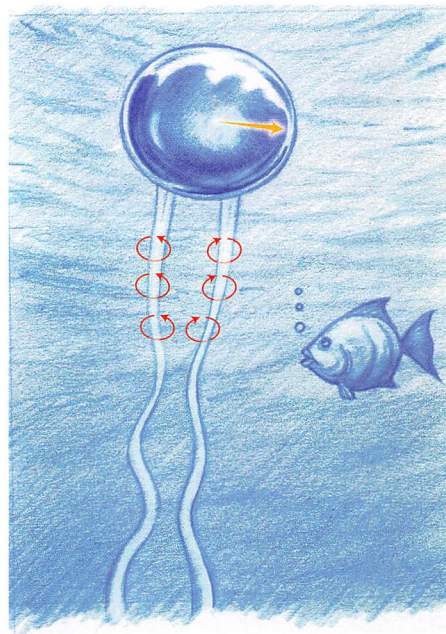
Quel est le rapport avec le mouvement latéral des bulles ? Comme pour l'avion, le double sillage d'une bulle témoigne de l'existence d'un écoulement tourbillonnaire de l'eau autour du corps aérien. Aux mêmes causes les mêmes effets : cet écoulement est à l'origine d'une portance perpendiculaire au mouvement de la bulle (*voir la figure 2*). Comme celle-ci se dirige vers le haut, la force créée est horizontale, d'où les mouvements qui semblent erratiques.

On peut se demander quelle est l'origine du mouvement tourbillonnaire. Pour l'aile de l'avion, c'est la forme même de l'aile qui, en dirigeant l'air vers le bas, crée le tourbillon. Pour la bulle, sphérique, le responsable n'est pas la forme, mais l'instabilité intrinsèque de l'écoulement. Plus la bulle est grande, moins les forces de frottement, qui stabilisent le mouvement, ont d'importance en valeur relative. Au-delà d'une taille critique, la moindre perturbation du mouvement de la bulle dans une direction crée un tourbillon qui la pousse de côté. Et plus la bulle est grosse, plus ses mouvements se compliquent, jusqu'à devenir erratiques et imprévisibles.

Le physicien Étienne Guyon avait étudié un phénomène de ce type qu'il avait dénommé l'effet *Popov* (il prenait ainsi les devants, sachant qu'un Russe l'avait probablement décrit avant lui !). Lâchez une balle de ping-pong dans l'eau près de la surface : elle jaillit perpendiculairement à la surface. Libérez-la à plus grande profondeur : les tourbillons ont le temps de s'installer et l'angle de sortie est plus souvent oblique.

Très bien, diriez-vous, mais pourquoi le même phénomène ne se produit-il pas avec des objets denses qui coulent dans un liquide ? Considérons une bille de densité double de celle de l'eau ; la somme de son poids et de la poussée d'Archimède est dirigée vers le bas et a exactement la même intensité que la force d'Archimède poussant

2 Pour un avion en vol (page ci-contre), l'air décrit autour des ailes un mouvement tourbillonnant, dont l'axe est perpendiculaire à la direction de l'avion. Aux extrémités des ailes, ces tourbillons se déforment et engendrent deux sillages parallèles à la direction de l'avion – deux lignes autour desquelles l'air s'enroule. La force de portance (flèche orange) créée par le mouvement tourbillonnaire est perpendiculaire au plan formé par les sillages. Il en est de même pour une bulle d'air en ascension dans un liquide (ci-contre) : les tourbillons du liquide créent une force qui dévie latéralement la bulle, si celle-ci est assez grosse.



une bulle de même taille. Pourtant, la bulle monte en zigzaguant alors que cette bille tombe tout droit.

La différence de comportement résulte de la différence d'inertie entre la bulle et la bille. Pour accélérer l'une ou l'autre, il faut aussi mettre en branle le milieu où elles se meuvent, c'est-à-dire l'eau. Au XIX^e siècle, lord Kelvin a montré que la masse d'eau entraînée par une sphère en mouvement accéléré est égale à la moitié de la masse de l'eau occupant un même volume que la sphère. Il en résulte que la bille a une masse inertielle cinq fois supérieure à celle de la bulle, assez pour stabiliser son mouvement vis-à-vis des petites perturbations.

La masse d'un objet n'est pas celle que l'on croit

Ainsi, l'action du fluide sur la bulle ou sur la bille ne se limite pas à une force de poussée et une force de frottement. L'inertie, propriété habituellement considérée comme intrinsèque, est aussi modifiée. D'anecdote, la solution à l'énigme soulevée par Léonard de Vinci devient troublante. Elle implique que pour déterminer la masse effective d'un objet, il faut également prendre en compte ses interactions avec son environnement.

Cette question intervient dans divers domaines de la physique. Relativement aisée pour une bulle dans l'eau, elle est délicate pour un électron interagissant avec son propre champ électromagnétique : l'interaction modifie sa masse en lui ajoutant une quantité... infinie ! Heureusement, grâce à d'ingénieuses méthodes dites de renormalisation, les théoriciens des particules ne coincent pas la bulle ; ils savent manipuler les nombreux infinis qui surgissent dans leurs calculs pour obtenir en fin de compte des inerties finies – et conformes aux résultats des expériences.

Clac végétal et uppercut de crevette

Certains animaux ou plantes effectuent des mouvements étonnamment rapides, en mettant à profit la mécanique de surfaces courbes semi-rigides.



Pour capturer sa proie ou la tuer, il faut agir vite et fort. Comment le faire lorsqu'on est une plante carnivore, dépourvue de muscles, ou une crevette? En stockant l'énergie sous forme élastique et en la libérant d'un coup. La dionée attrape-mouches (*Dionaea muscupula*) ferme ainsi ses mâchoires végétales en un dixième de seconde, tandis que la crevette-mante *Odontodactylus scyllarus* assène son « coup-de-poing » en deux millisecondes (voir les figures 1 et 2). Point commun de ces deux champions de rapidité : ils stockent l'énergie en déformant une paroi élastique courbée.

Dionée : une fermeture... éclair!

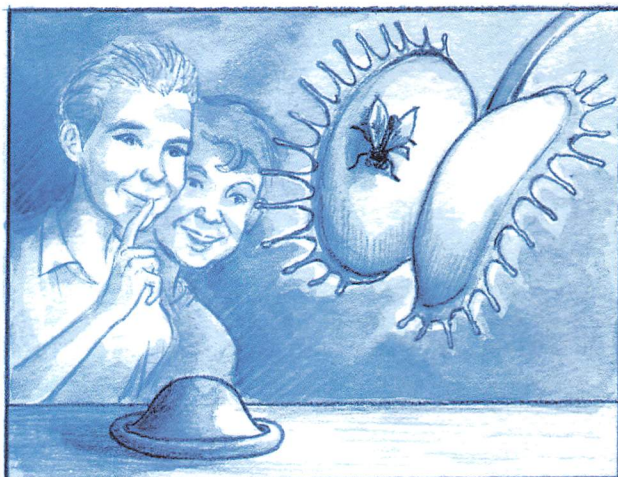
Le piège de la dionée se compose de deux feuilles se faisant face. Quand un insecte se pose sur l'une des faces internes de ces mâchoires végétales, celles-ci se referment brusquement et capturent la proie – qui sera ensuite lentement digérée. Comment cette plante produit-elle un mouvement, aussi rapide de surcroît? Par un mécanisme analogue à celui à l'œuvre chez les fleurs qui s'ouvrent le matin pour se refermer le soir.

Grâce au phénomène d'osmose, les cellules végétales contrôlent leur teneur en eau et leur pression interne en modifiant la concentration intracellulaire de certains ions. Lorsque la concentration ionique à l'intérieur d'une cellule augmente, de l'eau est aspirée vers l'intérieur de la cellule à travers ses parois : la cellule se gonfle. Ce phénomène

est réversible, et quand la concentration ionique diminue, la cellule se dégonfle. Dans un pétale, ces deux effets se produisent simultanément : les cellules d'une des faces du pétale se gonflent tandis que celles de l'autre face se dégonflent. La face aux cellules dégonflées devient concave, celle aux cellules gonflées convexe. Ainsi, les modifications de pression cellulaire se traduisent par des mouvements macroscopiques.

Qu'en est-il des cellules de la dionée ? Des observations récentes ont révélé quelques particularités. Les cellules de la face externe des deux feuilles du piège sont très allongées et disposées le long de la surface de la feuille, perpendiculairement à l'axe qui joint les deux feuilles. Les parois de ces cellules sont en outre renforcées par des microfibrilles latérales qui font obstacle à un gonflement uniforme. Tout changement de volume de ces cellules se traduit essentiellement par un allongement. Les cellules de la face interne ne se déformant que très peu, il s'ensuit une modification de la courbure de la feuille, initialement convexe (recourbée vers l'intérieur).

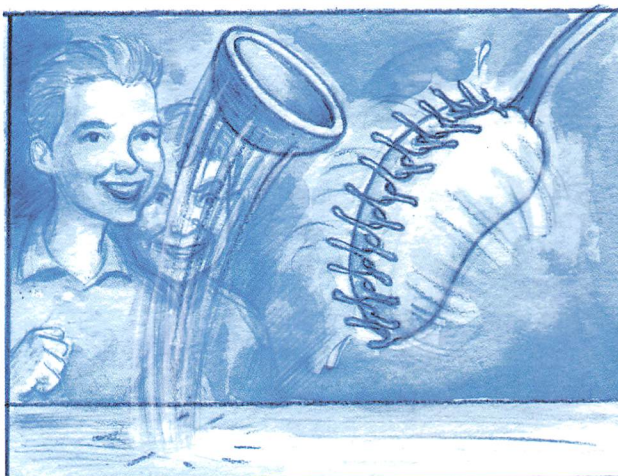
Quand un malheureux insecte touche un cil de la dionée, des cellules mécano-transductrices créent un signal qui stimule les cellules et les fait grossir par osmose. La courbure de la feuille change jusqu'à s'inverser brusquement, piégeant l'insecte entre les deux feuilles.



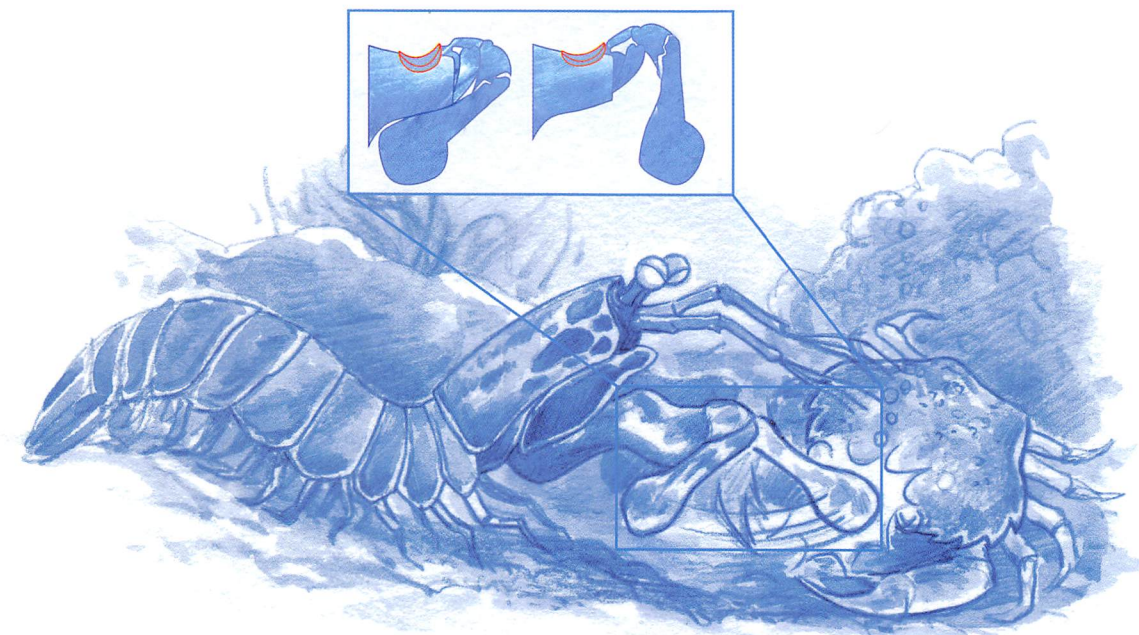
La déformation de la puce

Mais pourquoi donc cette fermeture est-elle si fulgurante, beaucoup plus rapide que ne le permettraient les transferts d'eau à travers les membranes cellulaires ? Tout s'éclaire quand on fait le rapprochement avec l'inversion de courbure de la puce, ce petit jouet élastique de forme hémisphérique qui saute en l'air quand on le retourne (voir la figure 1). Le principe mécanique à l'œuvre est identique.

Prenons l'exemple d'une feuille plane ; on peut la plier facilement dans un sens ou dans l'autre. Ce n'est pas le cas avec une surface courbe, telle une calotte de sphère. Lorsqu'on cherche à aplatir cette surface en réduisant la courbure selon une direction, on constate qu'elle se replie dans la direction perpendiculaire, ce qui engendre des forces s'opposant à la déformation recherchée.



1 La « puce », jouet en forme de calotte que l'on retourne, inverse sa courbure brusquement, ce qui lui permet de sauter en l'air et de réjouir les enfants. Avant cette transition brutale, la surface élastique s'est lentement déformée, jusqu'à atteindre le seuil de la transition. La dionée, plante carnivore, utilise un phénomène analogue : l'insecte posé sur la face interne de la feuille déclenche une réaction physiologique qui déforme peu à peu les feuilles. Au bout d'un tiers de seconde, la courbure des feuilles franchit un seuil et le piège se referme en un dixième de seconde.



2 La crevette-mante assène un coup de patte en deux millisecondes. Pour frapper aussi rapidement, la crevette a au préalable emmagasiné de l'énergie élastique dans un élément de carapace en forme de selle

de cheval (*en rouge sur le schéma*). La frappe correspond à une détente brutale de ce « ressort », relayée par un système de bras articulés pour amplifier le mouvement.

La dynamique de la déformation consistant à inverser la courbure dépend de la nature du matériau. Si celui-ci est très élastique, les forces d'opposition engendrées sont modérées, et par conséquent la courbure diminue et s'inverse progressivement. En revanche, si l'élasticité du matériau est faible, de fortes contraintes naissent et le matériau passe brusquement d'une forme à une autre, de la même façon qu'une poutre en compression ploie soudainement. C'est l'instabilité dite de flambage, transition brutale entre deux formes extrêmes stables.

L'énergie de la crevette stockée dans une selle de cheval

La vitesse de ce basculement est régie par un seul paramètre, déterminé par les caractéristiques géométriques du matériau (épaisseur, longueur, courbures initiales). Elle est d'autant plus grande que l'épaisseur du matériau est faible et sa longueur, ou sa courbure, élevée. Toutefois, cette rapidité a un prix, car le délai entre l'amorce du mouvement et le basculement augmente aussi.

Pour en revenir à la dionée, la nature est bien faite : la géométrie de ses feuilles correspond au seuil d'instabilité de leurs surfaces. Cet excellent compromis correspond à une phase préparatoire d'un tiers de seconde et à une fermeture en un dixième de seconde.

Que la feuille soit moins rigide et la fermeture serait trop lente, qu'elle soit plus rigide et la phase préparatoire durerait trop longtemps : l'insecte s'échapperait.

Une propriété analogue est utilisée par la crevette-mante, qui s'attaque à des crabes et autres petits animaux en perçant leur carapace. Elle a certes des muscles, mais ceux-ci ne peuvent expliquer ses performances spectaculaires. La vitesse de sa frappe varie entre 14 et 24 mètres par seconde, son bras a une vitesse de rotation comprise entre 670 et 990 radians par seconde, tandis que l'accélération peut atteindre 60 à 114 kilomètres par seconde carrée, soit quelque 10 000 fois l'accélération de la pesanteur, le tout ne durant que 2,4 millisecondes !

La puissance nécessaire par unité de masse est de l'ordre de $4,7 \times 10^5$ watts par kilogramme. Elle est au moins 100 fois supérieure à celle qu'un muscle peut fournir. Il faut donc au préalable stocker cette énergie. Pourquoi pas sous forme élastique ? Là encore, la tension nécessaire est bien plus élevée que celle supportée par un tendon ou un muscle. Le « ressort » mis en jeu doit par conséquent travailler en compression. Pour agir rapidement, il ne doit pas être massif tout en étant résistant.

Une tige ne conviendrait pas, à cause des risques de flambage. Alors quoi ? Comme la dionée, la crevette-mante stocke son énergie dans une surface élastique – ici en forme de selle de cheval. Dans une première étape, cette surface est progressivement déformée au moyen de muscles, et empêchée de reprendre sa forme initiale grâce à un dispositif à cliquet. Dans une seconde étape, le « ressort » se détend et un système mécanique complexe de bras articulés transforme cette détente de faible amplitude en mouvement de grande ampleur. Les deux leviers successifs sont très dissymétriques : le premier, très court, amorce un mouvement de rotation que le second, beaucoup plus long, transforme en mouvement linéaire. La frappe est tellement rapide qu'elle produit de la cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles au sein de l'eau, phénomène qui participe sans doute à l'endommagement de la carapace de la proie.



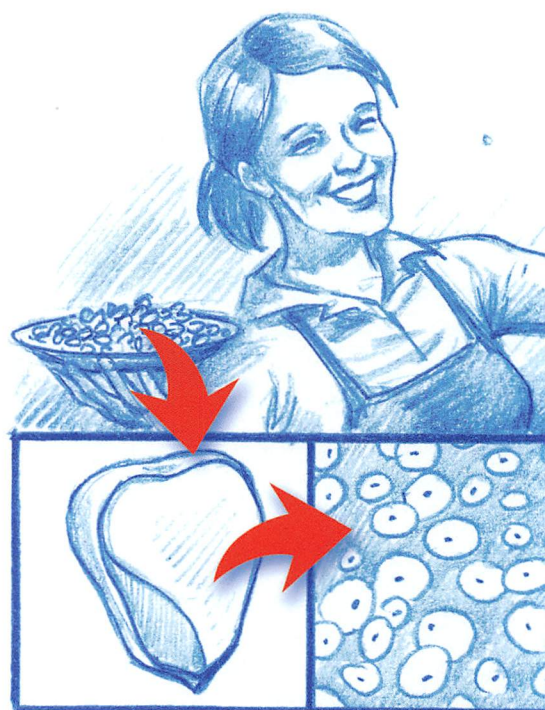
Shutterstock / PLS

Le pop-corn, c'est emballant

Le maïs soufflé ressemble beaucoup au polystyrène expansé, avec lequel on protège des colis fragiles. Il a aussi l'avantage d'être comestible...

Jetez une poignée de grains de maïs *Butterfly* dans une casserole huilée, chauffez à feu vif quelques minutes... c'est prêt! Difficile de faire plus simple que cette recette du maïs soufflé, plus connu sous le nom de pop-corn. Pourtant, le résultat est exceptionnel: une mousse solide dont les qualités ne sont pas uniquement nutritives et gustatives, mais aussi mécaniques. Le maïs soufflé résiste à la pression et amortit les chocs aussi bien que le polystyrène expansé, dont la préparation demande des installations industrielles perfectionnées. Comment une simple cuisson de quelques grains peut-elle aboutir au même résultat?

Le principe de fabrication du polystyrène expansé est relativement simple. Le polystyrène est un matériau polymère composé de longues chaînes de molécules de styrène. En lui adjoignant un hydrocarbure qui s'évapore à basse température, tel le pentane, on obtient des granules solides de polystyrène expansible. Ces granules se transforment en polymère



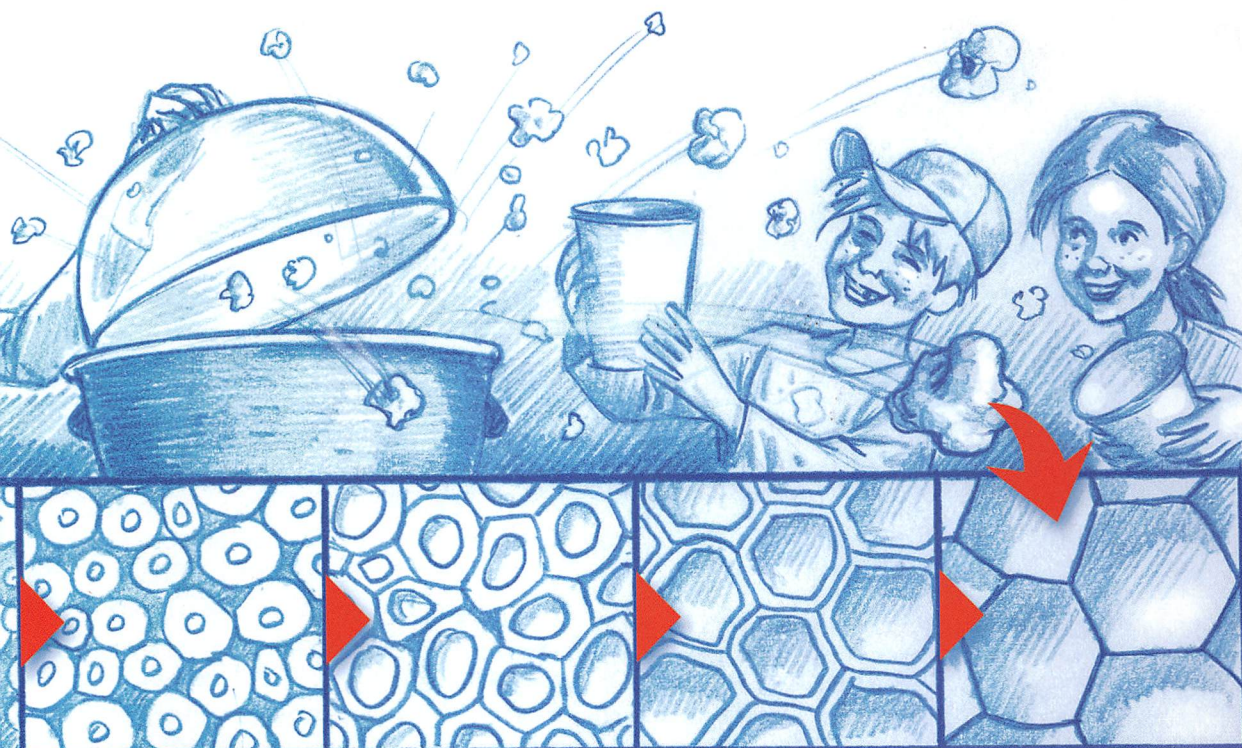
expansé par simple chauffage: lorsque la température s'élève, le polystyrène devient pâteux et le pentane se vaporise. L'expansion de la vapeur fait gonfler la matrice et la rend légère et poreuse une fois que le pentane s'est échappé: la mousse solide obtenue est 50 fois moins dense que l'eau. En fait, cette apparente simplicité de fabrication cache de nombreuses étapes intermédiaires que l'on doit parfaitement contrôler.

Un matériau expansible complet

Avec le pop-corn, c'est beaucoup plus facile, car le grain de maïs contient d'emblée tous les ingrédients d'un matériau expansible. Son cœur, l'endosperme, se compose surtout d'amidon, polymère dont la brique de base est le glucose et dont les propriétés sont voisines de celles du polystyrène. Ce dernier, pâteux vers 120°C, fond entre 150 et 180°C, tandis que l'amidon devient visqueux vers 150°C. L'amidon de l'endosperme du maïs se présente sous forme de granules d'une dizaine de micromètres de diamètre. Ils contiennent entre 8 et 25 pour cent d'eau (en masse), qui va jouer ici le rôle du pentane.

1 L'endosperme du grain de maïs contient d'innombrables et minuscules granules d'amidon. Chaque granule contient une microcavité où, lors du chauffage, de la vapeur d'eau se forme. En gonflant, cette cavité repousse l'amidon

et fait grossir les granules, qui s'écrasent les uns contre les autres. On finit par obtenir une mousse solide, dont les pores sont séparés par des parois d'amidon minces, mais résistantes.



Généralement, si l'on cuit des grains de maïs, on obtiendra... des grains carbonisés ! Le pop-corn nécessite une variété de maïs spécifique. Les grains de la variété *Butterfly*, plus petits que les autres, ont une coque externe plus résistante. L'arrangement de ses fibres de cellulose est plus dense. Cela présente deux avantages. Tout d'abord, sa conductivité thermique est meilleure : quand la coque est chauffée, elle transmet plus de chaleur à l'endosperme, dont la température croît plus vite et de façon plus homogène. En outre, cette coque est presque imperméable et a une résistance mécanique importante. Il reste toutefois nécessaire de la chauffer de façon homogène, soit en utilisant de l'huile, soit avec de l'air chaud.

Qu'advient-il lorsqu'un grain de maïs *Butterfly* chauffe ? À 100°C , son eau commence à se vaporiser. Si la coque est étanche, la vapeur reste confinée à l'intérieur et la pression augmente peu à peu. À neuf atmosphères, la coque se rompt et le grain éclate. La température interne est alors d'environ 180°C . Ainsi, chaque grain se comporte comme une petite cocotte-minute très performante. Pour cette raison, le maïs à pop-corn doit être conservé avec soin : des grains abîmés par des chocs, trop secs ou au contraire exposés à l'humidité, n'éclatent plus, ou mal. L'expérience montre qu'une teneur en eau de 12 à 15 pour cent est optimale.

Expansion et refroidissement

Si tous les bons ingrédients sont présents, pourquoi, lors de l'éclatement du grain, les granules d'amidon ne se dispersent-ils pas aux quatre vents, mais donnent au contraire

un matériau homogène ? Cela tient aux propriétés de l'amidon et à la structure des granules. Chacun d'eux contient une cavité microscopique de l'ordre d'un demi-micromètre de diamètre, qui favorise l'apparition d'une bulle de vapeur en son centre et qui sera donc à l'origine d'un pore du matériau expansé. Quand l'évaporation débute, à 100°C , la pression exercée par la vapeur sur les parois de cette cavité repousse l'amidon. Les granules commencent à gonfler et viennent s'écraser sur leurs voisins.

À 150°C , l'amidon devient visqueux et les granules se collent les uns aux autres. Enfin, quand la coque du grain éclate, vers 180°C , la pression revient brutalement à la pression atmosphérique. La vapeur présente au sein de chaque cavité se dilate alors fortement. Les parois d'amidon, devenu malléable et caoutchouteux, accompagnent cette détente : elles s'amincissent. Les longues molécules



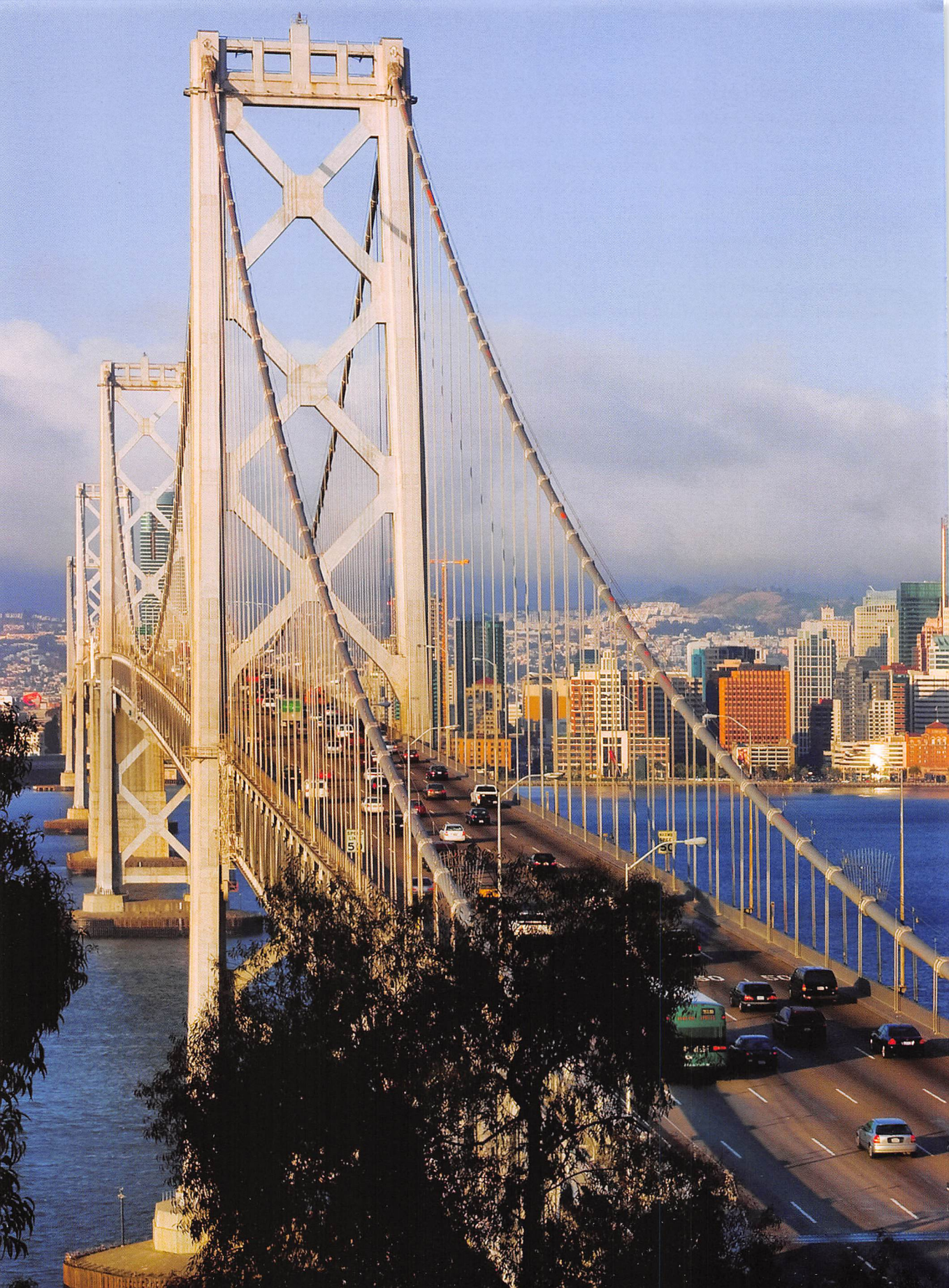
2 Le pop-corn peut servir à emballer des objets fragiles, en raison de ses bonnes propriétés amortissantes. Un tel emballage est facile à fabriquer et est biodégradable, mais sa durée de vie est faible et il craint l'humidité. Les industriels développent cependant des solutions pour remédier à ces inconvénients.

qui constituent l'amidon glissent les uns par rapport aux autres, mais ne rompent pas; les parois ne se déchirent donc pas.

L'expansion de cette mousse s'accompagne du refroidissement du grain à cause de l'évaporation de l'eau. Ce refroidissement est si important qu'il pourrait la stopper si un second mécanisme ne venait le contrebalancer: la solidification de l'amidon, qui dégage de la chaleur et réduit le refroidissement de moitié. En fin d'expansion, le grain de maïs soufflé a une température de 135 °C et un volume égal à près de 30 fois son volume initial. On comprend l'importance de la teneur en eau du grain dans ce processus: trop faible, la pression ne monte pas assez dans le grain pour que sa coque se fende; trop élevée, il subsiste trop d'eau dans l'amidon, qui reste pâteux et dur.

Comme le polystyrène expansé, le pop-corn est très peu dense: 45 centimètres cubes par gramme pour le pop-corn commercial, contre 55 centimètres cubes par gramme pour le polystyrène expansé. Les qualités amortissantes de ces matériaux sont excellentes: l'air piégé dans les pores fait office de ressort et les parois solides absorbent l'énergie lors de leur déformation. À ce jeu, le pop-corn bat le polystyrène. Ainsi, lorsqu'on fait tomber une masse de 2,6 kilogrammes d'une hauteur de 90 centimètres sur une plaque de 6 centimètres d'épaisseur, la masse rebondit à la vitesse de 1,45 mètre par seconde sur du polystyrène expansé, et à 0,33 mètre par seconde sur un matériau à base de pop-corn!

Aussi, la Poste américaine n'hésite pas à conseiller à ses clients d'utiliser du pop-corn alimentaire comme garniture d'emballage pour les colis fragiles. En France, une société commercialise même du pop-corn d'emballage issu de maïs de jachère (non consommable). Les avantages sont évidents. Le produit peut être fabriqué sur place avec une simple source de chaleur, ce qui élimine le problème du stockage, et l'emballage est biodégradable. L'inconvénient est la sensibilité à l'humidité: il faut donc soit l'utiliser rapidement, soit le protéger. C'est ce qu'a réussi récemment une jeune entreprise agenaise, *Pop-Nat*, dont le pop-corn conserve ses propriétés durant plus de trois mois. Son produit permet de réaliser des boîtes à bouteilles ou des enveloppes, mais il est onéreux. Gageons que l'intérêt de nos sociétés pour la préservation de l'environnement facilitera la mise sur le marché de tels produits, si le bilan écologique total (la culture du maïs est polluante) est effectivement positif.



Est-ce bien solide ?



Ponts, tours, voitures, pierres...

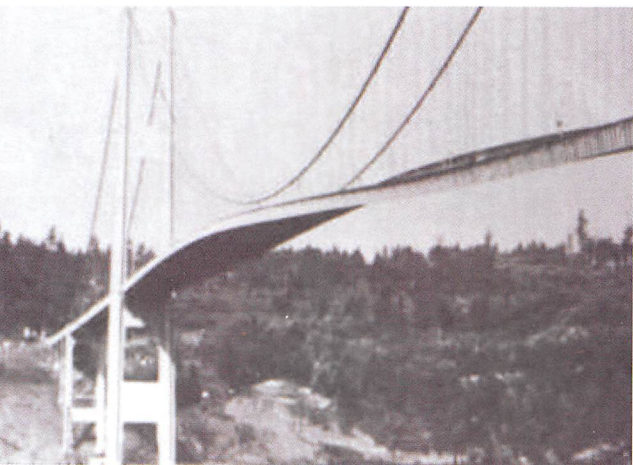
Comment résistent-ils
ou s'effondrent-ils ?



Shutterstock / Andy z

Le *Golden Gate Bridge*, à San Francisco.

Pont de Tacoma : la contre-enquête



Nos limiers physiciens déclarent que l'effondrement du pont de Tacoma, en 1940 aux États-Unis, n'est pas dû à un phénomène de résonance.

Les oscillations du pont de Tacoma avant son effondrement.

Le 7 novembre 1940, après d'impressionnantes oscillations, le pont de Tacoma s'écroule, sous les yeux médusés de nombreux témoins. Cette catastrophe sans victimes, mais abondamment filmée et photographiée, a acquis depuis une renommée mondiale, avec un coupable tout désigné : le phénomène de résonance. L'erreur judiciaire pointe, car contrairement à ce qui est affirmé dans nombre d'ouvrages, l'accusé n'est pas à l'origine de la catastrophe.

Commençons l'enquête par les faits. Avant les funestes événements du 7 novembre 1940, la victime était déjà bien connue des services de sécurité de l'État de Washington. Dès sa prime jeunesse, le pont de Tacoma, inauguré le 1^{er} juillet 1940, se comportait dangereusement. Son tablier avait la fâcheuse tendance d'osciller verticalement dès qu'une petite brise se levait. Ces oscillations d'une amplitude de plusieurs dizaines de centimètres étaient impressionnantes. Mais l'élasticité naturelle des matériaux permettait au pont de se déformer sans rompre. Soumis à des sollicitations extérieures telles que le vent ou le passage des véhicules, le pont se mettait à osciller selon des modes bien définis. Ses concepteurs estimaient toutefois que ces oscillations resteraient limitées et qu'il n'y avait pas de soucis majeurs de sécurité. Le début de l'automne sembla leur donner raison : le pont résista aisément à des vents de plus de 80 kilomètres par heure.

Mais le matin du 7 novembre, sous l'effet de vents modérés (60 à 70 kilomètres par heure), le tablier du pont se met à vibrer plus que d'habitude, avec une amplitude de plus de un mètre, assez pour interdire le trafic. À dix heures du matin, coup de théâtre : les oscillations verticales se transforment en torsions périodiques ! À partir de ce moment, à chaque va-et-vient, l'inclinaison du tablier par rapport à l'horizontale augmente, jusqu'à

atteindre des déplacements du tablier de neuf mètres et une inclinaison de 45 degrés. Ce nouveau régime d'oscillation est fatal: au bout d'une demi-heure, des morceaux du pont commencent à tomber dans le fleuve, et à 11h02, près de 200 mètres de tablier se détachent. Le pont de Tacoma a vécu.

La résonance dispose d'un alibi

À quoi attribuer ce désastre? La rumeur ne tarda pas à accuser le phénomène de résonance et, encore de nos jours, c'est cette fausse explication qui est colportée. Rappelons ce qu'est une résonance avec l'exemple d'un enfant sur une balançoire. À cause des frottements, les oscillations de la balançoire cessent d'elles-mêmes si l'on n'apporte pas continuellement de l'énergie au système. Les pertes d'énergie étant faibles, il suffit à un parent compatissant de pousser régulièrement l'enfant pour entretenir le mouvement ou pour en augmenter l'amplitude. S'il règle précisément la fréquence de ses interventions sur le rythme des oscillations de la balançoire, il lui suffira d'exercer une toute petite force pour obtenir un effet très important: c'est le phénomène de résonance.



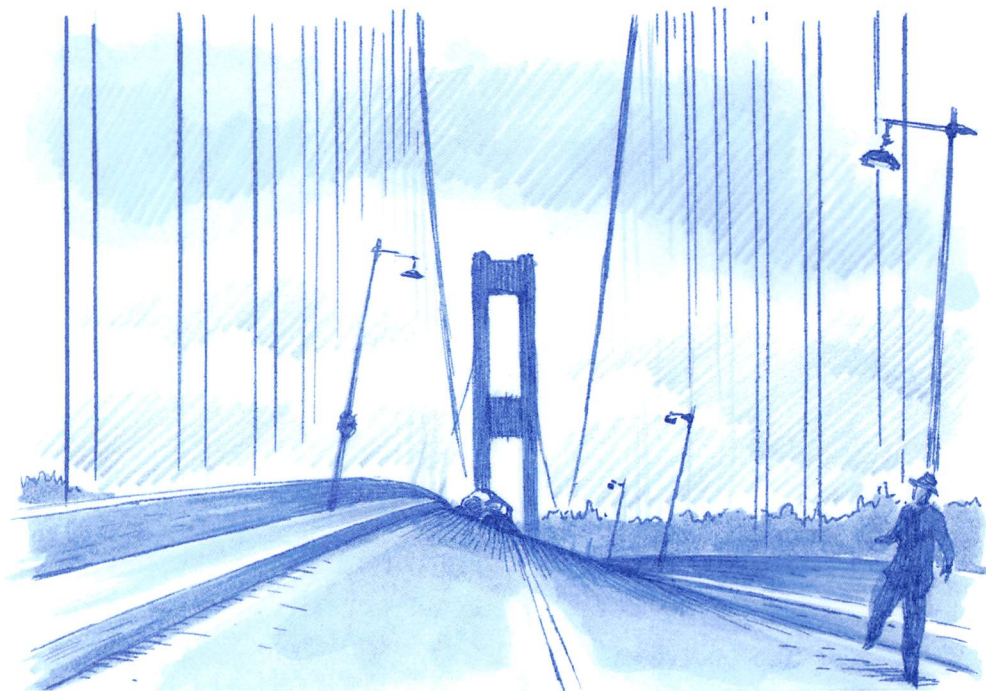
1 Résonance avec une balançoire : une faible poussée, imprimée à la même fréquence que les oscillations de la balançoire, compense les pertes d'énergie par frottements et augmente peu à peu l'amplitude du mouvement.

Une structure complexe (pont, immeuble, véhicule, etc.) présente en général différents modes de vibration, chacun pouvant entrer en résonance à une fréquence caractéristique. L'effondrement partiel d'une autoroute californienne, en 1989, à la suite d'un séisme, semble ainsi dû à une résonance à deux hertz, l'une des fréquences propres de vibration de la structure autoroutière: le terrain sous-jacent filtrait les fréquences des mouvements du sol et transmettait justement celles qui étaient proches de deux hertz.

En était-il de même pour le pont de Tacoma, le vent turbulent jouant le rôle du tremblement de terre? La réponse est «oui» pour les oscillations que connaissait le pont depuis sa construction, mais «non» pour celles qui ont provoqué sa rupture. Les rafales de vent ne pouvaient avoir l'énergie et la régularité nécessaires sur une durée aussi longue que celle observée: plus d'une demi-heure, avec une période de cinq secondes, c'est-à-dire une fréquence de 0,2 hertz.

L'accusation ne se laissa pas démonter. Faisant preuve d'une grande culture physique, elle fit appel aux «allées de von Karman». Il s'agit de rangées périodiques de tourbillons semblables à celles qu'on observe dans l'eau derrière les piliers des ponts. Elles apparaissent quand un fluide s'écoule assez vite autour d'un obstacle fixe. À la série de tourbillons aérodynamiques créés par le tablier du pont est ainsi associée une dépression qui s'exerce alternativement sur le dessus puis le dessous du tablier.

La force périodique qui s'ensuit aurait-elle fait entrer le pont de Tacoma en résonance? Le réquisitoire est séduisant, mais il tourne court. En effet, le calcul de la fréquence



2 Avant de s'effondrer, le tablier du pont de Tacoma a subi, sous l'influence de vents modérés, des oscillations verticales ainsi que des mouvements périodiques de torsion le long de son axe, l'inclinaison allant jusqu'à 45 degrés.

d'émission de ces tourbillons donne un hertz, soit cinq fois plus que le 0,2 hertz observé par les témoins ou mesuré en soufflerie sur des maquettes.

Quel est alors le vrai coupable ? On ne peut décrypter le comportement du pont de Tacoma en faisant intervenir séparément les oscillations du pont et l'écoulement aérodynamique. En revanche, tout s'éclaire quand on comprend que ces deux phénomènes se couplent et s'amplifient l'un l'autre.

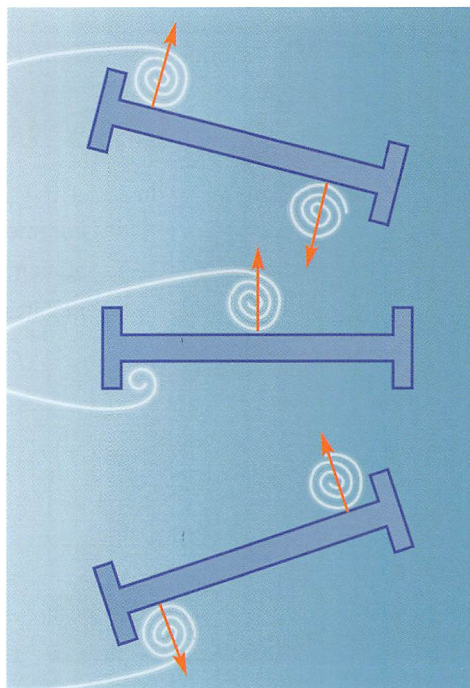
La section du tablier a une forme de H très aplati : les barres verticales correspondent aux parapets qui se trouvent de part et d'autre de la chaussée. Lorsque le vent souffle de côté, il rencontre un parapet. Cet obstacle vertical crée naturellement deux tourbillons identiques de part et d'autre du tablier. Leurs effets mécaniques sur le pont se compensent. Cette symétrie est cependant brisée dès que la chaussée s'incline : le tourbillon qui se trouve sur la face du pont protégée du vent grossit et tire le tablier vers le haut, ce qui accentue l'inclinaison. En revanche, quand le mouvement s'inverse, le tourbillon décroche du parapet et parcourt la largeur du tablier avant de s'éloigner tandis que, de l'autre côté, un autre tourbillon croît.

Un complot torsion-tourbillons

L'oscillation du tablier crée donc des tourbillons synchrones, dont l'action amplifie l'oscillation ; en retour, celle-ci donne naissance à des tourbillons encore plus importants, et ainsi de suite. C'est ce mécanisme subtil qui a provoqué *in fine* l'effondrement du pont de Tacoma.

Ainsi, il ne s'agit pas d'une résonance sous l'effet d'une force périodique. Telle une anche oscillant sous le souffle régulier du clarinettiste, le pont de Tacoma est entré en vibration sous l'effet du vent. Ces vibrations se sont couplées à des tourbillons, couplage qui a amplifié les mouvements.

Les procureurs très pointilleux pourraient souligner une faiblesse de notre argumentation. La reconstitution laisse en effet de côté la naissance des mouvements de torsion. Ce point est toujours controversé : rupture ou déplacement subit d'un câble de soutien ? Couplage entre différents types de tourbillons ? Comme dans toutes les bonnes affaires criminelles, il reste une petite part de mystère.



3 Quand le vent souffle de côté (ici de gauche à droite), les parapets du pont engendrent des tourbillons d'air au-dessus et au-dessous du tablier. Si le tablier reste horizontal, les forces (flèches rouges) exercées sur le pont par les tourbillons se compensent. En revanche, si le tablier oscille périodiquement autour de son axe, les tourbillons amplifient ces mouvements de torsion.



Shutterstock / Richard Williamson

Des tours qui chavirent

Comment réduire la sensibilité des gratte-ciel
au vent ou aux séismes ? En plaçant de lourdes masses
mobiles à leurs sommets.

Les tours *Petronas* à Kuala Lumpur, en Malaisie.

La rigidité et la résistance des matériaux de construction assurent la solidité des bâtiments. Plus effilés et plus hauts que leurs prédécesseurs, les gratte-ciel d'aujourd'hui sont aussi plus flexibles. Lorsque la terre tremble ou sous l'effet de puissantes rafales de vent, ces constructions oscillent, un peu comme des roseaux. Ces oscillations sont désagréables pour les occupants et risquent d'endommager la structure. Comment les réduire, en particulier quand on a affaire à une tour haute de plusieurs centaines de mètres ?

La *Citicorp* en danger

À la vue de la tour *Citicorp* à New York, avec ses 59 étages et ses 279 mètres de haut, on a du mal à croire que de simples rafales de vent la menacent. C'est pourtant ce que concluait William Lemessurier, l'ingénieur en chef, un an après l'inauguration du bâtiment en 1977 : à cause de joints inadaptés, il y avait un risque de 50 pour cent que des dégâts majeurs se produisent sous l'effet de rafales de vent de 115 kilomètres par heure soufflant durant cinq minutes. Or de telles conditions météorologiques sont observées à New York tous les 16 ans en moyenne... Il fallait faire quelque chose !

Un bâtiment n'est jamais totalement rigide. Tel un roseau, il peut osciller sous l'effet des rafales de vent. La fréquence de ces oscillations est de l'ordre de dix hertz pour un bâtiment de un étage, de deux hertz pour un bâtiment de trois à cinq étages, de un hertz pour un bâtiment de 10 à 20 étages et de 0,2 hertz pour les gratte-ciel. Dans ces derniers, l'amplitude des oscillations atteindrait quelques dizaines de centimètres au

sommet si rien n'était fait pour les prévenir. Une telle déformation n'est pas gênante si elle s'amortit rapidement. C'est souvent le cas dans des tours anciennes comme l'*Empire State Building* : avec une structure en acier complétée par de la maçonnerie en granite et en pierre calcaire, l'ensemble est très massif et très rigide, ce qui limite l'amplitude des oscillations, et les frottements entre murs garantissent un bon amortissement.

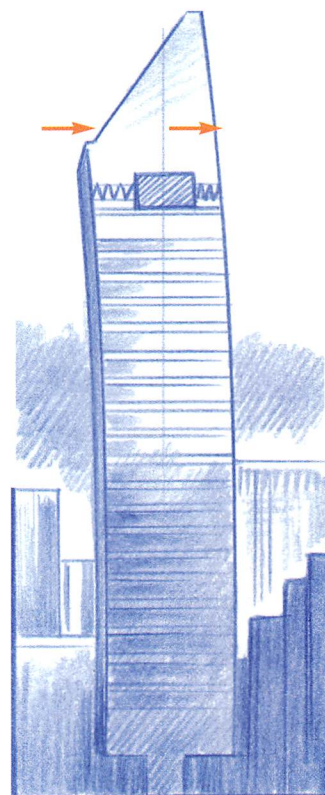
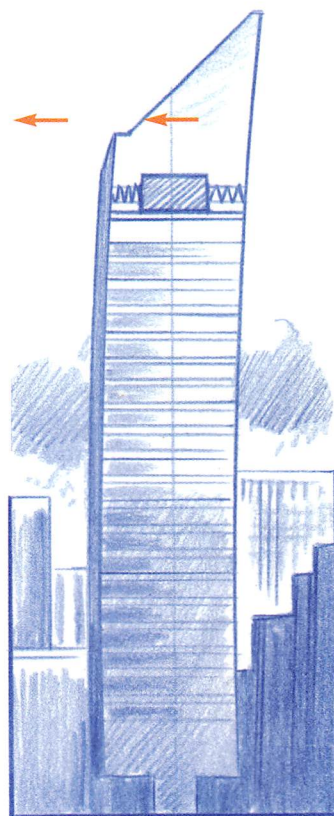
400 tonnes sur de l'huile

Aujourd'hui, en dehors des poutrelles en acier, les gratte-ciel font le plus souvent appel à l'aluminium et au verre, ce qui les rend plus légers, plus effilés, plus beaux... mais aussi moins aptes à dissiper l'énergie vibratoire ! La tour *Citicorp* oscille ainsi avec une période de 6,5 secondes, et l'amplitude de ces oscillations ne diminue que de un pour cent par cycle ; il faut donc une bonne dizaine de minutes pour que la vibration s'éteigne d'elle-même. Or pendant cet assez long laps de temps, des forces extérieures telles que les rafales de vent peuvent entretenir les oscillations, voire les amplifier par effet de résonance jusqu'à la catastrophe, comme le préoyaient les nouveaux calculs de W. Lemessurier.

Pour limiter ces oscillations, il suffit d'utiliser, comme pour les véhicules, des amortisseurs. Mais à la différence de ce que l'on fait pour une automobile en reliant la partie mobile (la caisse) à la partie en contact avec le sol (les roues), il n'est pas possible de relier le sommet de la tour au sol. La solution la plus souvent retenue depuis une trentaine d'années est d'installer au sommet du gratte-ciel un oscillateur résonnant muni d'un dispositif d'amortissement.

C'est ce qui avait été réalisé lors de la construction de la tour *Citicorp* pour assurer le confort des occupants. Cet oscillateur 250 fois plus massif que tous ceux installés jusqu'alors est composé d'une masse de quelque 400 tonnes placée sur une couche d'huile et reliée aux murs par des ressorts et des amortisseurs. En vertu de sa grande inertie, lorsque les vibrations de la tour sont rapides, la masse tend à rester immobile par rapport au sol tandis que les murs bougent : le ressort de l'un des côtés se comprime pendant que l'autre se détend. Ces ressorts exercent alors sur la structure des forces qui tendent à la ramener vers sa position initiale (voir la figure 1).

1 L'oscillateur de la tour *Citicorp* est constitué d'une masse de 400 tonnes, reliée à la structure par des ressorts et des amortisseurs. Quand la tour vibre sous l'influence de violentes rafales de vent, la masse reste en place par inertie, et des forces de rappel (en orange) s'exercent sur la tour.

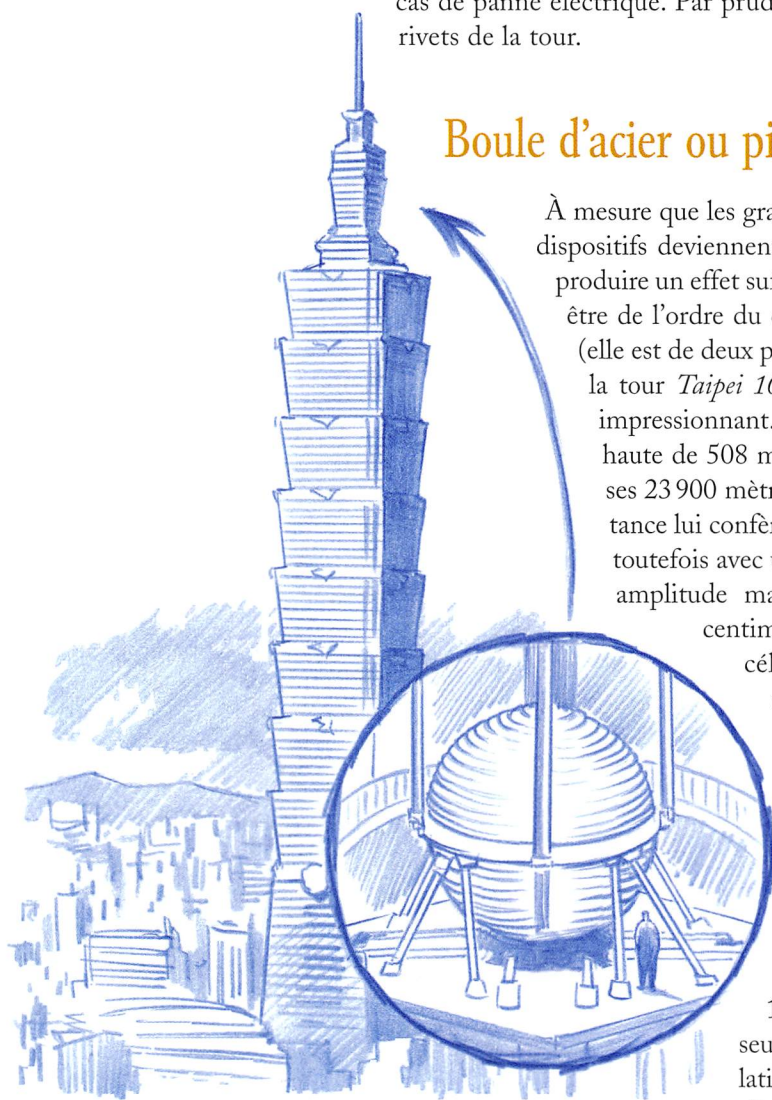


De plus, lorsque la fréquence naturelle d'oscillation de la tour et celle du dispositif installé sont identiques, l'énergie mécanique se transfère alternativement d'un oscillateur à l'autre. L'intérêt est alors double : l'énergie se répartit en moyenne équitablement sur les deux oscillateurs, ce qui réduit en moyenne l'amplitude des oscillations de l'immeuble. Par ailleurs, le mouvement relatif entre le bâtiment et la masse étant important (les ressorts supportent des déplacements de 1,4 mètre), il est facile d'introduire de l'amortissement : l'atténuation atteint 14 pour cent pour la masse, et cinq pour cent (au lieu de un) pour la tour. Avec ses nouveaux calculs, W. Lemessurier s'aperçut que cet oscillateur initialement prévu pour le confort était en fait crucial pour la sécurité de la structure. Il décida donc d'installer des générateurs électriques de secours, permettant aux 12 coussinets d'huile sous pression qui soulèvent la masse de rester actifs même en cas de panne électrique. Par prudence, il fit aussi renforcer tous les rivets de la tour.

Boule d'acier ou piscine en U

À mesure que les gratte-ciel prennent de la hauteur, les dispositifs deviennent de plus en plus imposants. Pour produire un effet suffisant, la masse de l'oscillateur doit être de l'ordre du centième de la masse du bâtiment (elle est de deux pour cent pour la *Citicorp*). Celui de la tour *Taipei 101*, à Taiwan, est particulièrement impressionnant. Cette tour a 101 étages et est haute de 508 mètres. Ses 95 000 tonnes d'acier et ses 23 900 mètres cubes de béton de grande résistance lui confèrent une bonne rigidité. Elle oscille toutefois avec une période de 6,8 secondes et une amplitude maximale de quelques dizaines de centimètres, ce qui correspond à une accélération horizontale atteignant quelques centièmes de l'accélération de la pesanteur : assez pour donner la nausée.

Le dispositif installé pour limiter les oscillations de la tour *Taipei 101* est un pendule : une boule d'acier de 5,5 mètres de diamètre et pesant 660 tonnes, suspendue par quatre câbles de 11,5 mètres de long. Des amortisseurs contrôlent l'amplitude des oscillations de cette masse. En cas de séisme important, les déplacements attendus seraient de deux à trois mètres, ce qui est excessif. Aussi, dès

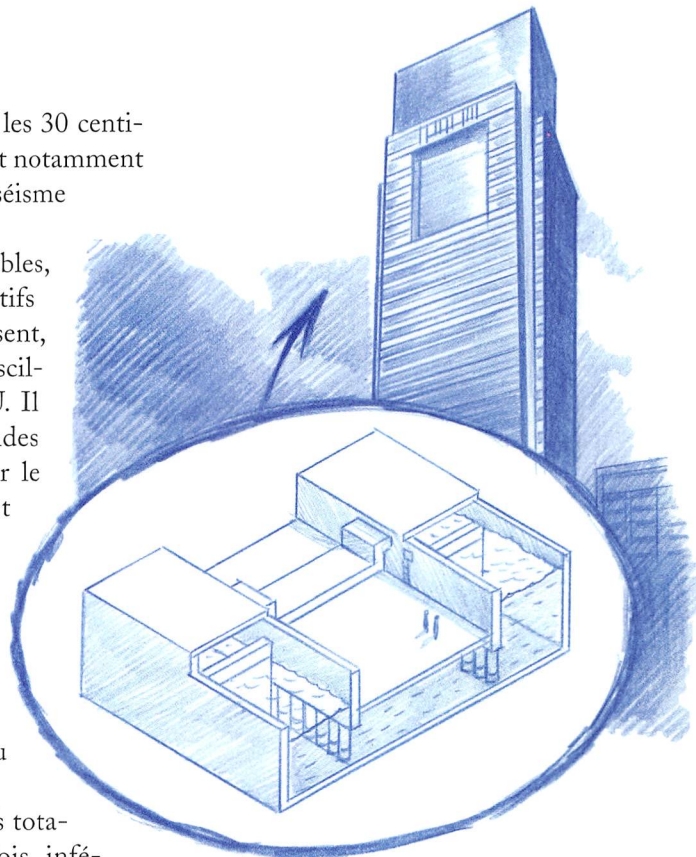


2 Les oscillations de la tour *Taipei 101* sont atténuées grâce à une boule d'acier de 660 tonnes, suspendue par quatre câbles de 11,5 mètres et reliée à des amortisseurs.

que l'amplitude des oscillations dépasse les 30 centimètres, la masse est bloquée. Cela permet notamment d'éviter des collisions avec les murs. Le séisme passé, la masse peut être relâchée.

Ces oscillateurs, devenus indispensables, s'améliorent et font appel à des dispositifs de plus en plus variés. Certains utilisent, plutôt que des masses solides, de l'eau oscillant dans des réservoirs en forme de U. Il est alors plus facile d'utiliser de grandes masses (1 100 tonnes par exemple pour le *Comcast Center* de Philadelphie) et d'ajuster les caractéristiques de l'oscillateur. En modifiant la pression de l'air au-dessus de l'eau, on change la raideur de ce «ressort» et ainsi sa fréquence propre d'oscillation. En modifiant la taille des vannes placées dans la canalisation, on augmente ou diminue la dissipation d'énergie.

On peut aussi réaliser des dispositifs totalement actifs avec des masses dix fois inférieures. L'accélération du bâtiment est mesurée en continu et une force contrebalançant ce mouvement est appliquée en accélérant une masse faible, mais rapide. Cette évolution conduit à appliquer aux bâtiments des méthodes analogues à celles utilisées pour stabiliser les véhicules, navires et avions.



3 Le *Comcast Center* à Philadelphie est muni d'un réservoir de 1 100 tonnes d'eau en forme de U. Les oscillations du liquide, amorties par des vannes, permettent d'atténuer celles du gratte-ciel.

Accéléromètres en mission

Les capteurs d'accélération servent à se repérer, à déclencher un airbag ou même à vérifier les fondements de la relativité générale.



Une *wiimote*, pour faire du sport en pantoufles.

Déterminer son mouvement et sa position à l'aveugle ? C'est possible si l'on sait d'où l'on vient, il suffit pour cela d'utiliser un accéléromètre. Le fonctionnement de ces dispositifs repose sur un principe physique simple, quoique la théorie d'Einstein nous en dévoile certaines subtilités. Et grâce à une miniaturisation poussée, ces dispositifs se banalisent dans notre quotidien.

Pour se repérer dans l'espace, l'idéal est de recourir à des balises dont la position est bien connue. C'est ce que faisait hier le marin en observant la position du Soleil et des étoiles. C'est ce que nous faisons aujourd'hui avec des cartes ou en utilisant un système de géolocalisation tel que le GPS. Cette dernière méthode a toutefois ses limites. La couverture, la précision et la fiabilité du système GPS n'assurent pas une sécurité suffisante pour la navigation aérienne, et ses signaux ne peuvent atteindre les sous-marins en plongée. En outre, à l'échelle de quelques centimètres ou pour les temps très brefs, le système est inopérant.

Comment faire alors ? Grâce à un accéléromètre, dispositif qui mesure l'accélération, c'est-à-dire les variations de vitesse au cours du temps, sans référence externe, on peut, connaissant notre vitesse et notre position initiales, déduire notre vitesse et notre position à chaque instant.

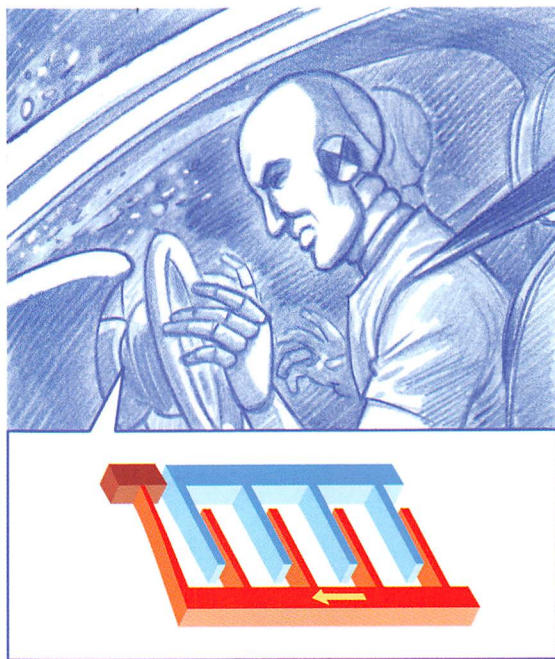
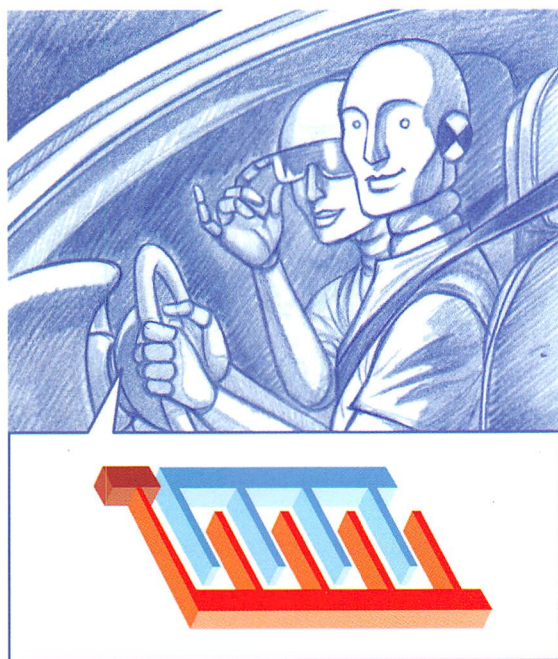
La mesure d'une accélération repose sur l'utilisation des forces d'inertie dont nous avons tous fait l'expérience. Lorsqu'une voiture démarre, elle accélère et le passager est plaqué sur son siège. Quand la voiture freine brutalement, il est au contraire projeté vers l'avant. Dans chaque cas, la force qui s'exerce sur le passager est proportionnelle à l'accélération du véhicule. On peut donc réaliser un accéléromètre avec trois éléments : un bâti solide de l'objet (le véhicule) dont on veut connaître les accélérations, une masse d'épreuve et un « lien » qui retient la masse d'épreuve au bâti.

Supposons ce lien légèrement flexible. Lorsque le bâti accélère, la masse d'épreuve, en raison de son inertie, prend un léger retard sur le bâti. Il s'ensuit une légère déformation du lien et un petit déplacement de la masse d'épreuve, proportionnel à l'accélération. En mesurant ce déplacement ou son effet, on détermine l'accélération qui en est à l'origine.

De l'accélération à la position

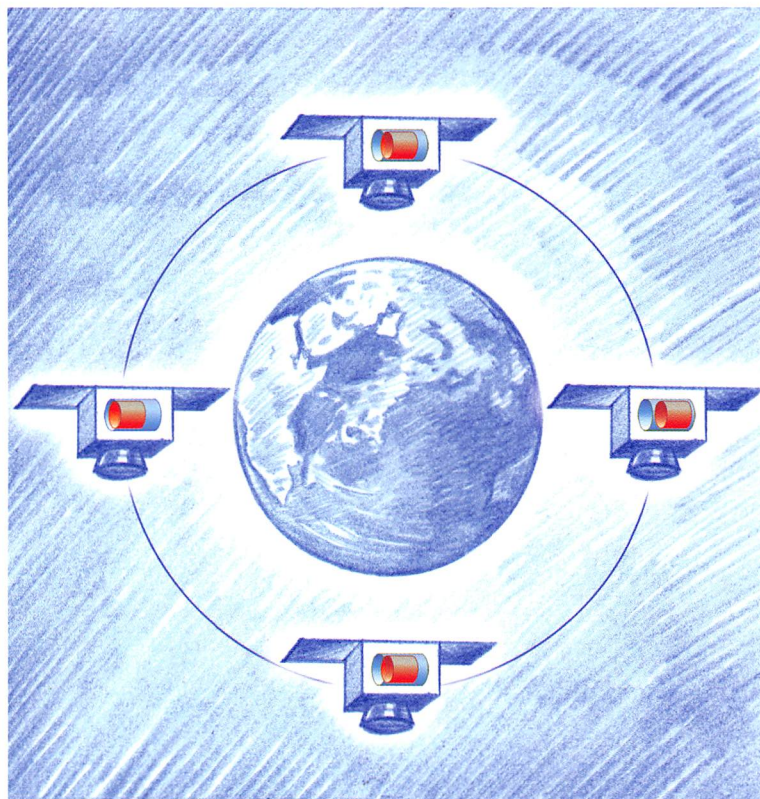
Parfois, c'est l'accélération elle-même qui est l'information recherchée. Ainsi, les airbags des automobiles doivent se déclencher lors d'un choc violent lorsque l'accélération (ici la décélération) dépasse un certain seuil, établi lors de crash-tests. Il s'agit de valeurs qui dépassent en général une vingtaine de fois l'accélération de la pesanteur g – lors d'un freinage même brutal, l'accélération ne dépasse pas $1g$.

Les accéléromètres utilisés sont très petits : sur une surface de quelques dizaines de micromètres carrés, se font face deux peignes de silicium d'une cinquantaine de dents. L'un des peignes est solidaire de la micromachine, tandis que l'autre y est attaché par une lamelle flexible. Quand l'accélération a lieu le long de l'axe du peigne (voir la figure 1), la distance entre les dents varie de quelques micromètres. Cela suffit



1 L'accéléromètre qui équipe les voitures et qui active l'airbag en cas de choc est constitué de deux peignes emboîtés, l'un (*en bleu*) étant fixé au véhicule, l'autre (*en rouge*) l'étant par l'intermédiaire d'une lame flexible. Lors

d'un choc, le peigne lié à la lame flexible est entraîné vers l'avant par inertie, ce déplacement permettant de mesurer la décélération subie. Au-delà d'une valeur seuil, l'airbag se déclenche.



2 Le petit satellite *Microscope*

aura pour mission de tester avec une précision inédite le principe d'équivalence, à savoir l'égalité de la masse inerte et de la masse pesante. Il embarquera pour ce faire deux doubles accéléromètres ultrasensibles (*un seul est représenté ici*). Chacun comportera deux cylindres creux concentriques (*en rouge, le cylindre interne*). Pour l'un des deux dispositifs, les deux cylindres seront en matériaux différents (platine et titane). Une violation du principe d'équivalence se traduira par un déplacement relatif de ces deux cylindres.

pour modifier la capacité électrique des peignes, qu'un dispositif électronique préalablement calibré traduit en accélération.

Pour déclencher un airbag, on détermine l'accélération selon une direction bien définie. Avec trois dispositifs orthogonaux, on mesurerait l'accélération selon les trois directions de l'espace. C'est ce que fait la *wii mote*, la commande d'une nouvelle plateforme de jeu vidéo. Elle mesure précisément les accélérations de la poignée jusqu'à des valeurs atteignant trois fois l'accélération de la pesanteur. Des mouvements très rapides de la main sont ainsi enregistrés, car un aller-retour d'une main sur un mètre en une seconde correspond à une accélération d'environ $2g$. Le tout dans une puce de moins de cinq millimètres coûtant quelques euros !

Si l'on cherche à déterminer notre position, l'accélération ne suffit pas : elle fournit les variations de vitesse et la vitesse fournit les variations de position, mais il faut connaître notre position et notre vitesse à un instant donné pour en déduire leurs valeurs aux instants ultérieurs. Pour la navigation aérienne, c'est le cas, puisque l'avion démarre à vitesse nulle d'une piste dont les coordonnées sont connues. Mais que faire pour la *wii mote* que l'on peut mettre en route d'où l'on veut ?

Ici, la solution vient d'un système auxiliaire, la *Sensor bar*, une barre longue d'environ 20 centimètres et munie d'une dizaine de diodes électroluminescentes infrarouges. Ces diodes émettent des signaux qui, reçus par le détecteur situé à l'avant de la *wii mote*, lui permettent de calculer sa position par triangulation, de la même façon

qu'un marin en cabotage détermine sa position en mesurant les directions de plusieurs repères côtiers. Mais cette méthode est peu précise en cas de mouvements rapides ou de faibles amplitudes. C'est justement pour pallier ce défaut que l'accéléromètre a été intégré.

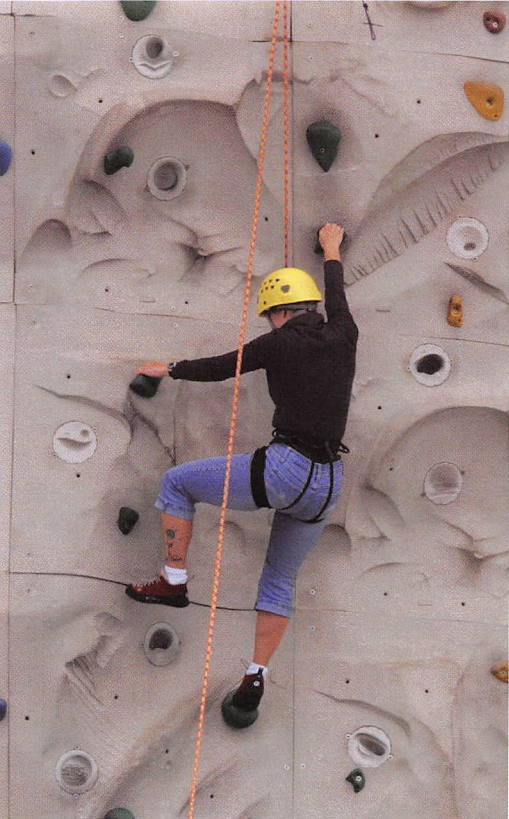
Dans la navigation aérienne, une seconde difficulté entre en jeu : la présence de la gravité. Comme l'a énoncé et interprété Einstein, la « masse inerte » d'un corps, qui caractérise sa résistance aux accélérations, est égale à sa « masse pesante », qui caractérise sa réaction à la gravitation. C'est en vertu de ce principe dit d'équivalence que, pour parler de l'attraction gravitationnelle de la Terre, on parle d'accélération de la pesanteur.

Ainsi, ce que mesure un accéléromètre est en réalité la somme des effets conjugués de la pesanteur et du mouvement accéléré. Pour les déplacements horizontaux, cela ne pose pas de difficulté, à condition que la mesure reste stable et précise tout le long du trajet. En revanche, pour mesurer les déplacements verticaux d'un avion ou d'un sous-marin, cet effet ne doit pas être omis : seule la parfaite connaissance du champ de pesanteur dans l'espace traversé permet de déterminer avec précision l'altitude ou la profondeur.

En pratique, le principe d'équivalence est très bien vérifié. Pour autant, il reste une loi établie empiriquement, dont les physiciens doivent tester les limites. La masse inerte se révèle égale à la masse pesante avec une précision relative de 10^{-12} au moins, mais certaines théories prédisent d'infimes déviations. Deux accéléromètres doubles embarqués dans *Microscope*, satellite de conception française dont le lancement est prévu en 2011, permettront de tester ce principe avec une précision 1000 fois meilleure (voir la figure 2).

Tester la théorie d'Einstein

Une fois en orbite autour de la Terre, les masses d'épreuve de ces accéléromètres devraient être en impesanteur, car la force d'inertie associée au mouvement du satellite doit compenser exactement l'attraction gravitationnelle de la Terre. Il s'agira de déterminer si cette compensation est exacte en comparant les forces subies par des masses de natures différentes. Le succès de l'expérience reposera sur des dispositifs de haute technologie, capables de mesurer des accélérations à une précision meilleure que 10^{-13} fois l'accélération de la pesanteur. Ce ne seront donc pas des accéléromètres miniaturisés, mais des instruments dont la masse est de l'ordre du kilogramme.



Shutterstock / Holger W.

Des chocs amortis... en toute sécurité

Comment diminuer les effets sur le corps humain d'une chute ou d'une collision ? En amortissant ; ce qui signifie une immobilisation rapide, mais pas trop.

Filets de protection ou harnais de sécurité sont là pour nous protéger lors d'une chute. Ceintures de sécurité et airbags font de même lors des accidents de voiture. Leur rôle est d'éviter le ralentissement trop brutal provoqué par le choc contre un obstacle ou un arrêt soudain : ils doivent donc être conçus pour amortir... en douceur. Quels principes guident la conception de ces systèmes de sécurité ?

Cascade sur matelas

Lorsqu'une personne en mouvement entre en collision avec un obstacle fixe, la transition à l'immobilité induit des forces intenses qui peuvent engendrer de graves blessures. Comment les éviter ? Regardons un cascadeur qui saute d'une grande hauteur. On a placé pour le réceptionner et amortir sa chute un épais matelas gonflable (*voir la figure 1*). Au lieu de s'immobiliser instantanément, le cascadeur est progressivement freiné par les forces de réaction du matelas, qui se déforme lors de l'impact.

Quelle doit être l'épaisseur du matelas ? Après une chute sous le seul effet de son poids (produit de sa masse par l'accélération g de la pesanteur), l'énergie cinétique acquise par le cascadeur est égale au travail de son poids, c'est-à-dire au produit de cette force par la hauteur de chute. À l'arrêt, l'énergie cinétique s'annule : le travail de la force de freinage – produit de cette force par la distance sur laquelle elle s'exerce – devra donc être égal à celui du poids. Pour une personne entraînée, on estime qu'il n'y a aucun souci si la décélération subie est inférieure à environ dix fois l'accélération de la pesanteur ($10g$ pour parler comme les aviateurs).

La force correspondante est, en vertu des lois de Newton, le produit de cette décélération par la masse du cascadeur. Par une règle de trois, on en déduit que la distance d'arrêt pour le cascadeur doit être d'au moins un dixième de la hauteur de la chute. Ainsi, pour un saut d'une hauteur de 11,5 mètres, correspondant à un immeuble de quatre étages, la vitesse à l'impact est de 15 mètres par seconde, soit 54 kilomètres par heure, et la distance d'arrêt minimale est d'un peu plus d'un mètre. En pratique, comme la force exercée n'est ni constante ni maximale dès le contact avec le matelas, une épaisseur de matelas de 1,5 à 2 mètres s'impose.

Pour se protéger des chutes involontaires, on a les mêmes contraintes. Comme il est impossible de placer d'épais matelas au bas de toutes les falaises ou de tous les chantiers, les alpinistes ou les travailleurs du bâtiment sont équipés de harnais. Des cordes relient ces harnais à la paroi ou à l'édifice. Elles doivent être solides, tout en permettant une immobilisation progressive qui respecte les distances minimales d'arrêt précédentes : ces cordes sont donc élastiques, mais pas trop (*voir la figure 2*). Ainsi, les cordes performantes disponibles actuellement sur le marché s'allongent de près de 10 pour cent lorsque l'alpiniste s'y suspend, et de près de 40 pour cent lors d'une chute test calibrée (hauteur de chute égale à 1,77 fois la longueur de la corde). Elles exercent au cours de cette chute une force maximale de 8000 newtons sur une personne de 80 kilogrammes, soit l'équivalent d'une décélération de 10g, sans risque pour l'alpiniste.

Des cordes élastiques

Cette élasticité a un inconvénient pour les longues descentes en rappel, c'est-à-dire lorsque c'est la corde qui soutient tout le poids de l'alpiniste, celui-ci étant suspendu dans le vide ou les pieds en appui sur la paroi : l'élasticité de la corde peut provoquer un effet



1 Pour éviter les dommages corporels lors d'une chute, la décélération à l'impact ne doit pas dépasser une dizaine de fois l'accélération g de la pesanteur. On en déduit que la distance sur laquelle l'immobilisation se produit, donc l'épaisseur du matelas de réception, doit être au moins égale au dixième de la hauteur de chute.



2 Afin de s'assurer contre une chute avec un amortissement supportable, les alpinistes utilisent des cordes qui, par élasticité, s'allongent d'environ 40 pour cent en cas de chute d'une hauteur égale au double de la longueur de corde. Pour une descente en rappel, en revanche, une telle élasticité est indésirable.

de yo-yo à chaque fois que l'alpiniste interrompt sa descente. Les alpinistes et surtout les spéléologues préfèrent alors des « cordes statiques », beaucoup moins élastiques puisque leur allongement sous l'effet du poids n'est que de un à deux pour cent. Ces cordes peuvent ainsi être moins épaisses et plus légères que les cordes qui servent à s'assurer. Il est impératif de ne pas les utiliser pour s'assurer : le ralentissement (au-delà de 100g) en cas de chute serait trop brutal.

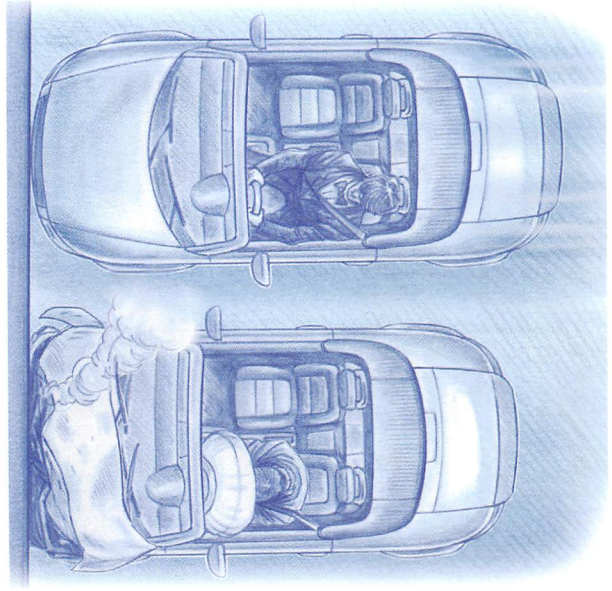
Nous sommes maintenant parés pour analyser la collision entre un véhicule et un obstacle immobile. Le premier effet de la collision est de stopper le véhicule. Si le passager n'a pas attaché sa ceinture de sécurité, il n'est soumis à aucune force horizontale. Il continue son avancée à vitesse constante et va heurter l'avant de l'habitacle qui, lui, s'est immobilisé. Pour une vitesse de 54 kilomètres par heure, typique des crashes-tests, ce choc est, comme on l'a vu, équivalent à une chute d'une hauteur de 11,5 mètres ! Le rôle de la ceinture de sécurité est de retenir le conducteur et les passagers pour les empêcher de percuter l'habitacle, en garantissant un ralentissement adapté (*voir la figure 3*).

Atténuer l'accident de voiture

La tension de la ceinture de sécurité, selon les normes les plus strictes de l'Association Euro NCAP (*European New Car Assessment Program*), ne doit pas dépasser 4000 newtons. Pour un passager sanglé par le torse et le bassin à deux points d'attache, cela correspond à une force totale maximale de 16000 newtons, soit 20g pour un homme de 80 kilogrammes. Pour cette force de freinage, la distance d'arrêt théorique est de 60 centimètres et, en pratique, d'au moins 80 à 100 centimètres.

La distance d'arrêt est supérieure à la longueur des bras, donc à la distance entre le

3 En cas de collision, il faut que le passager du véhicule subisse une décélération supportable, ce qui nécessite une ceinture de sécurité adaptée et une distance d'arrêt supérieure à un certain seuil. Mais compte tenu de cette distance d'arrêt du corps du passager, le choc avec l'habitacle doit être évité. L'avant du véhicule est conçu pour se déformer et s'écraser, ce qui permet à l'habitacle, qui est rigide, d'avancer et ainsi d'éviter son contact avec le passager. Un airbag complète le dispositif pour protéger la tête.



torse et le volant. Comment alors éviter le choc entre eux ? Il suffit qu'au cours de la collision, le volant lui aussi avance ! C'est pourquoi l'habitacle des voitures modernes est rigide, afin que le siège ne s'approche pas du volant, tandis que l'avant du véhicule a été conçu pour se déformer et s'écraser. Des mesures sur un crash-test de véhicule léger montrent ainsi que, lors de la collision, la décélération de l'habitacle augmente jusqu'à un maximum de 40g. Pendant la durée du choc, d'environ 0,08 seconde, l'habitacle s'est déplacé de plus de 70 centimètres, ce qui suffit pour éviter le contact entre le conducteur et le volant.

Pour être totalement efficace, ce système est complété par deux dispositifs. Durant la conduite normale, la ceinture n'est pas tendue. Afin d'éviter que le corps ne s'éloigne trop du siège avant que la ceinture soit sous tension, le véhicule est équipé de dispositifs de «prétension». Dès que le choc est détecté par des accéléromètres, des prétensionneurs de ceinture se mettent en action : des dispositifs électroniques et mécaniques amènent rapidement la ceinture à la tension optimale, avant que le passager ait trop avancé par rapport à son siège.

Ensuite, lors du choc, le corps et le cou se plient, et la tête part en avant : d'une masse d'environ cinq kilogrammes, la force nécessaire pour l'arrêter à 20g est de l'ordre de 1000 newtons. Cette force ne provoque pas de lésions fatales, mais une flexion du cou. On complète donc le dispositif par un airbag qui évite les chocs de la tête contre le pare-brise, le volant ou les genoux. Ces airbags permettent aussi d'amortir les chocs latéraux pour lesquels l'espace de sécurité est plus réduit.

Jeux de boules creuses ou pleines



Dans les sports de boules, la façon de jouer dépend de la structure interne des boules utilisées.

Tirer ou pointer ? Pétanque ou boule lyonnaise ? À ces questions classiques s'ajoute celle du choix entre boules creuses et boules pleines. Nous, physiciens parisiens, ne trancherons pas entre les joueurs de pétanque, farouches défenseurs des boules d'acier creuses, et les amateurs de boule lyonnaise qui utilisent désormais, dans leur grande majorité, des coques de bronze remplies de caoutchouc. Essayons plutôt de comprendre comment la structure interne de la boule influence son comportement et quelles sont les conséquences du choix des matériels adoptés par les fédérations sportives.

Vues de Paris, la pétanque, la boule lyonnaise et la *bocce* (italienne) présentent de fortes similarités, tant pour le matériel utilisé que pour les règles. Ces jeux sportifs opposent deux équipes dont l'objectif est de lancer des boules afin qu'elles s'arrêtent aussi près que possible d'une petite boule de bois, le but (ou bouchon, ou cochonnet) lancé à plusieurs mètres des joueurs. Parmi les stratégies les plus communes, on peut « pointer », c'est-à-dire essayer d'amener sa boule aussi près que possible du but, ou « tirer », c'est-à-dire la lancer vivement afin qu'elle frappe une boule adverse et l'écarte du but (*voir les figures 1 et 2*).

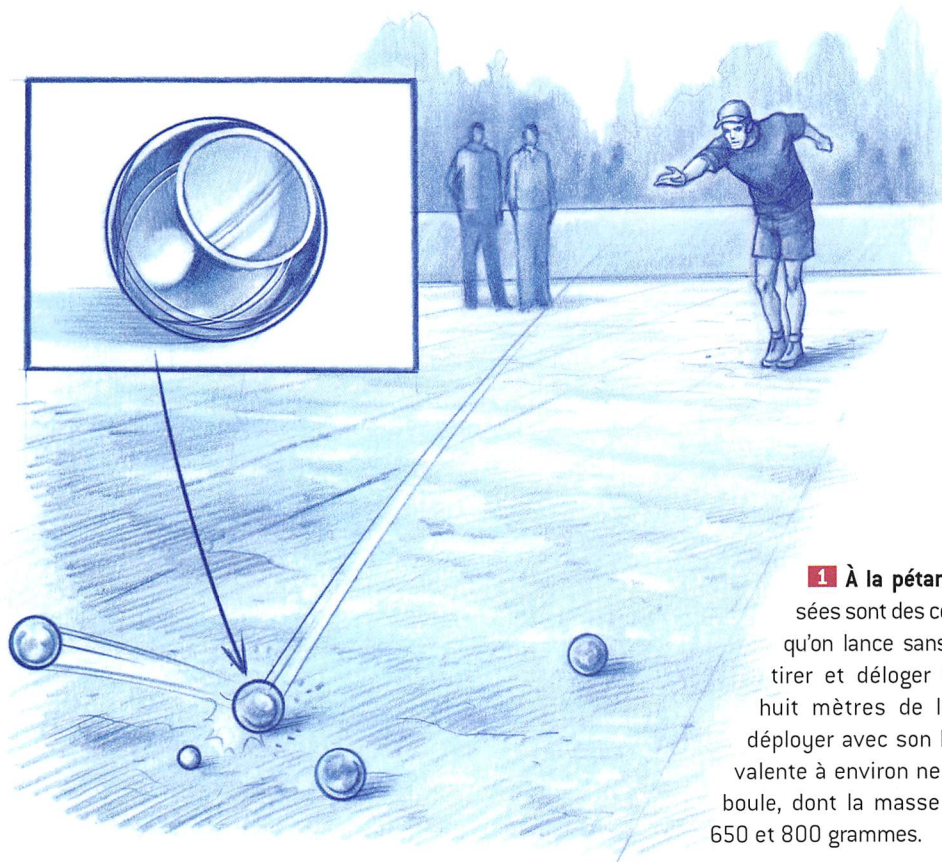
Examinons maintenant le matériel. Faite en acier, une boule de pétanque pèse entre 650 et 800 grammes pour un diamètre compris entre 7,05 et 8 centimètres. Connaissant la masse volumique de l'acier (7,85 grammes par centimètre cube), on calcule aisément qu'une boule de pétanque est 2,5 fois plus légère qu'une boule d'acier massif de même diamètre. Il en est de même pour les boules lyonnaises, plus grosses (diamètres compris entre 9 et 11 centimètres) et plus lourdes (pesant de 900 à 1 200 grammes). Comme nous l'avons indiqué, ces boules sont constituées d'une coque en métal, épaisse de quelques millimètres, dont l'intérieur est vide ou rempli d'un matériau moins dense.

Une coque de métal

Au début d'une partie, une fois le bouchon lancé, il s'agit pour le premier joueur de pointer. Un élément déterminant est le terrain. Le rebond de la boule et le chemin qu'elle parcourt en roulant dépendent de façon cruciale de la composition du terrain en terre, sable ou petits gravillons, et de son humidité. Une première tentation est de réduire l'influence aléatoire du terrain par un choix approprié de matériel. Des tricheurs y ont pensé, en lestant l'intérieur des boules d'un peu de sable ou de mercure. L'effet est d'abaisser le centre de gravité et de supprimer le roulement de la boule. Ce type de remplissage est totalement proscrit dans les différentes variantes des sports de boules.

Pour la pétanque, la seule marge de manœuvre est le choix de la dureté de l'acier utilisé. Comme les paramètres du sol sont difficilement mesurables, ce choix est fondé sur l'expérience et le style de jeu du bouliste. Concentrons-nous donc sur le tir, une phase du jeu où le terrain est moins déterminant.

À la pétanque, le but se trouve entre six et dix mètres du lanceur. Si le joueur souhaite tirer une boule à, disons, huit mètres, il lui faut lancer sa boule à une vitesse minimale d'environ 8,5 mètres par seconde avec un angle un peu inférieur à 45 degrés. La trajectoire suivie par la boule est alors une parabole. L'effort requis n'est pas anodin. L'accélération de la boule avant



1 À la pétanque, les boules utilisées sont des coques d'acier creuses, qu'on lance sans course d'élan. Pour tirer et déloger une boule située à huit mètres de lui, le bouliste doit déployer avec son bras une force équivalente à environ neuf fois le poids de la boule, dont la masse est comprise entre 650 et 800 grammes.

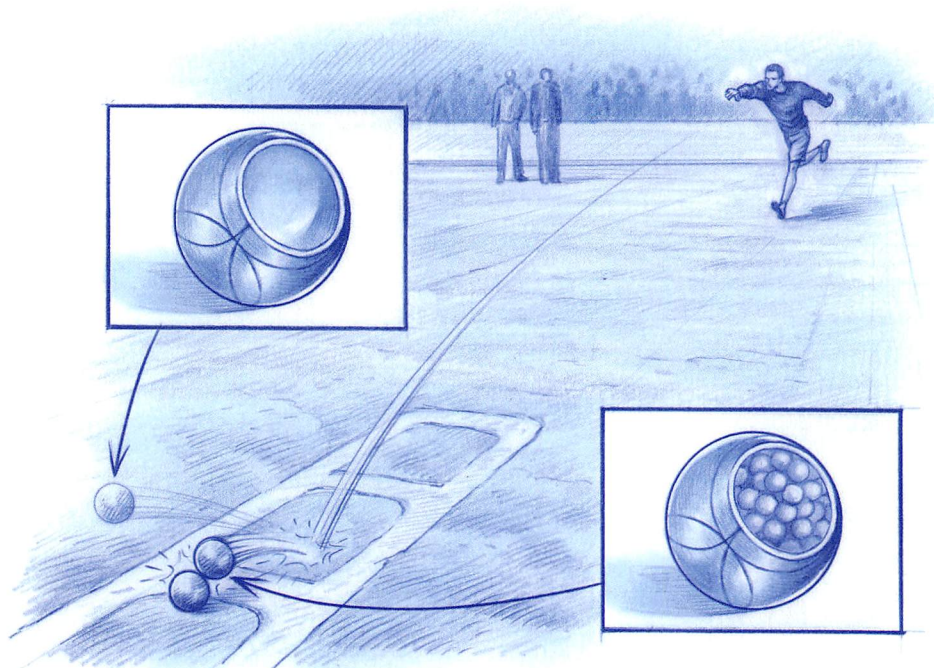
le lancer, égale au rapport du carré de la vitesse par la longueur du bras du tireur, est de l'ordre de 90 mètres par seconde carrée, soit neuf fois l'accélération de la pesanteur. Autrement dit, pour la pétanque, la force nécessaire à la main pour lancer la boule atteint neuf fois son poids.

Lancer avec ou sans élan

Pour la boule lyonnaise, la cible est à au moins 12,5 mètres, et la distance peut aller jusqu'à 18 mètres. Dans ce cas extrême, on doit propulser la boule à 13 mètres par seconde. Si le mouvement du tireur était identique à celui de la pétanque, la main aurait à fournir une force égale à 20 fois le poids de la boule. On comprend mieux la nécessité d'un élan : la vitesse de course du bouliste diminue d'autant la vitesse avec laquelle le bras doit propulser la boule.

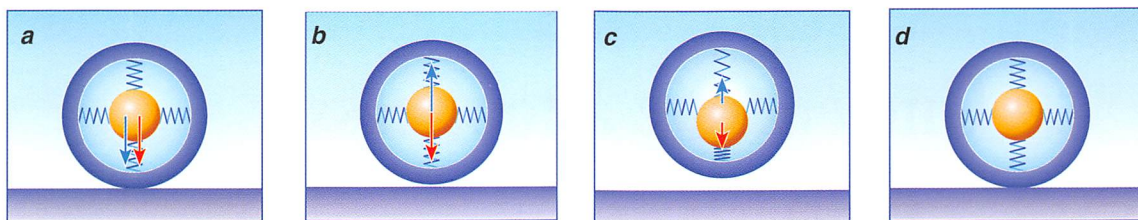
Le tireur de boule lyonnaise a d'autres préoccupations : pour déloger une boule adverse de sa position, l'idéal est de réaliser un tir tendu et de frapper « plein fer », c'est-à-dire de façon que la trajectoire de la boule lancée passe par le centre de la boule visée. Si les deux boules ont la même masse, on peut obtenir un transfert presque total d'énergie de l'une à l'autre, la première étant stoppée net tandis que la seconde part avec la même vitesse que la boule incidente.

Les bons tireurs réussissent presque systématiquement le plein fer. Mais il y a toujours des situations difficiles où il faut assurer le tir en se donnant un peu de marge



2 À la boule lyonnaise, le terrain est plus long qu'à la pétanque et les boules plus lourdes, ce qui explique le recours à une course d'élan. Par ailleurs, la plupart des pratiquants de ce sport utilisent aujourd'hui des

boules remplies de matériau caoutchouteux, qui rebondissent peu et qui, de ce fait, facilitent le tir. Ainsi, le tir figuré ici serait raté avec une boule creuse, qui rebondirait au-dessus de la boule visée sans la toucher.



3 Une boule racleuse, qui rebondit peu, peut être assimilée à une coque métallique (en bleu) séparée d'une masse interne (en orange) par une couche d'élastomère (symbolisée ici par quatre ressorts). Lorsque la boule heurte le sol, la coque et la masse interne ont la même vitesse (a). À l'instant précis du rebond, la vitesse de la coque s'inverse (b, flèche

bleue). Les mouvements opposés de la coque et de la masse interne décentrent celle-ci et entraînent une compression de l'élastomère dans le bas de la boule et une extension dans le haut (c). En revenant à sa forme initiale (d), l'élastomère dissipe en chaleur une partie de l'énergie de l'impact, ce qui atténue le rebond.

d'erreur. Il vaut mieux alors tirer légèrement trop court que trop long : la boule du tireur rebondit au sol juste devant la boule cible, puis la percute (voir la figure 2). En pratique, le rebond est tel que si l'impact au sol se produit moins de dix centimètres devant la boule visée, celle-ci sera touchée. En revanche, si le tir est plus court, la boule rebondira au-dessus de sa cible, qui sera manquée.

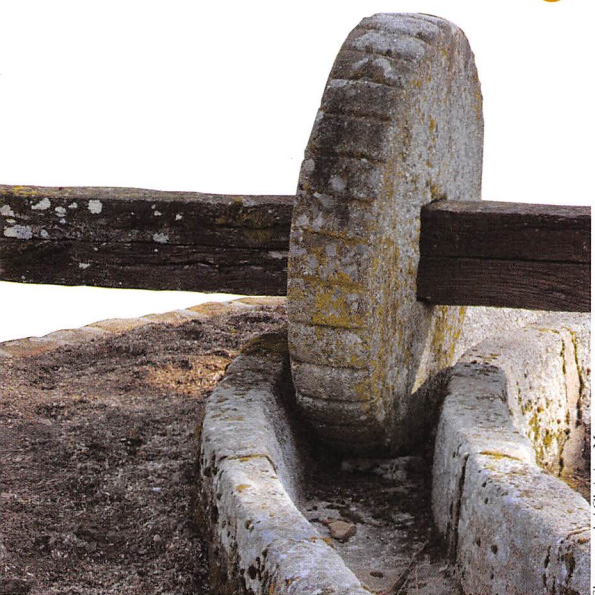
Des boules racleuses

Mais nos amis italiens, aussi pragmatiques à la *bocce* qu'au football, ont trouvé une astuce mise en œuvre aux tournois mondiaux de Melbourne en 1988. Ils ont utilisé des boules dites racleuses, qui rebondissent très peu. Cette caractéristique est obtenue en remplissant l'intérieur de la coque avec des matériaux caoutchouteux, qui dissipent en partie l'énergie du choc.

Pour comprendre le comportement d'une boule racleuse, supposons que la masse de la boule soit répartie pour moitié entre la coque et la masse interne, toutes deux reliées par une couche d'élastomère. Laissons tomber cette boule par terre (voir la figure 3). Au moment où la coque heurte le sol, elle rebondit et, si le choc est bien élastique, elle repart vers le haut avec la même vitesse que la vitesse initiale. À cet instant précis, coque et masse interne ont des vitesses opposées et égales : la quantité de mouvement totale de la boule est nulle et son centre de gravité immobile. Si l'élastomère qui relie coque et masse interne se comporte comme un amortisseur et dissipe en chaleur l'énergie qui le comprime, la coque et la masse interne sont stoppées : le rebond est supprimé. Après cette absorption rapide d'énergie, l'élastomère reprend sa forme initiale et la boule retrouve son centrage.

Ainsi, on peut faciliter la tâche du tireur en réduisant le rebond grâce à un remplissage approprié de la boule. Est-ce acceptable du point de vue sportif ? Les fédérations ont tranché en fonction de leurs activités et de leurs traditions. Alors qu'à la pétanque, les remplissages ont été proscrits, ils ont été autorisés en boule lyonnaise, en raison de la longueur des lancers : la seule condition à respecter est que les boules restent centrées. Il n'existe pas de boule racleuse idéale, et c'est le joueur qui choisit le type de remplissage qui lui convient le mieux – mélange de poudre d'élastomère additionnée de particules métalliques, bracelets de caoutchoucs tenus par des ressorts en métal, etc.

Une énergie à tout casser



Broyer de la matière solide pour la réduire en tout petits grains : cette opération est banale en apparence, mais elle est étonnamment gourmande en énergie.

Une ancienne meule.

Qu'il s'agisse de moudre du blé ou de broyer de la pierre pour fabriquer du ciment, réduire de la matière en poudre nécessite énormément d'énergie. C'est pourquoi l'homme a très tôt domestiqué l'énergie du vent et de l'eau en inventant les moulins. Aujourd'hui encore, le broyage représente plusieurs pour cent de la consommation mondiale d'énergie. Pourtant, pour fragmenter un solide, il s'agit simplement de briser des liaisons non chimiques entre atomes, ce qui ne semble pas exiger une très grande énergie. Pourquoi le rendement énergétique des processus de broyage est-il si mauvais ?

Essayons d'évaluer l'énergie nécessaire pour obtenir la fine poudre dont est rempli un sac de ciment. La matière première est un mélange de calcaires et de marnes. Les roches, grossièrement concassées en morceaux de quelques centimètres, doivent être broyées jusqu'à des dimensions de quelques dizaines de micromètres, soit une réduction de taille d'un facteur 10 000. Le mélange obtenu, le cru, est alors cuit et le produit de la cuisson, le clinker, est de nouveau broyé.

Si nous disposions d'un scalpel moléculaire, nous pourrions envisager, comme un cuisinier qui prépare une brunoise, de couper chaque grain en deux, puis en quatre, etc. À chaque étape, de nombreuses liaisons entre atomes sont brisées, proportionnellement à l'aire de la surface créée. Combien de liaisons ? La taille approximative d'un atome étant de 0,3 nanomètre, il occupe en surface une aire de 10^{-19} mètre carré. Ce sont donc près de 10^{19} liaisons qui disparaissent pour chaque mètre carré tranché. Sachant que l'énergie d'une liaison est de l'ordre de quelques électronvolts, soit environ 5×10^{-19} joule, il faut en théorie quelque cinq joules pour trancher un mètre carré (sur deux faces). Cet ordre de grandeur est conforme à des mesures effectuées sur la découpe des végétaux ou sur le clivage du mica.

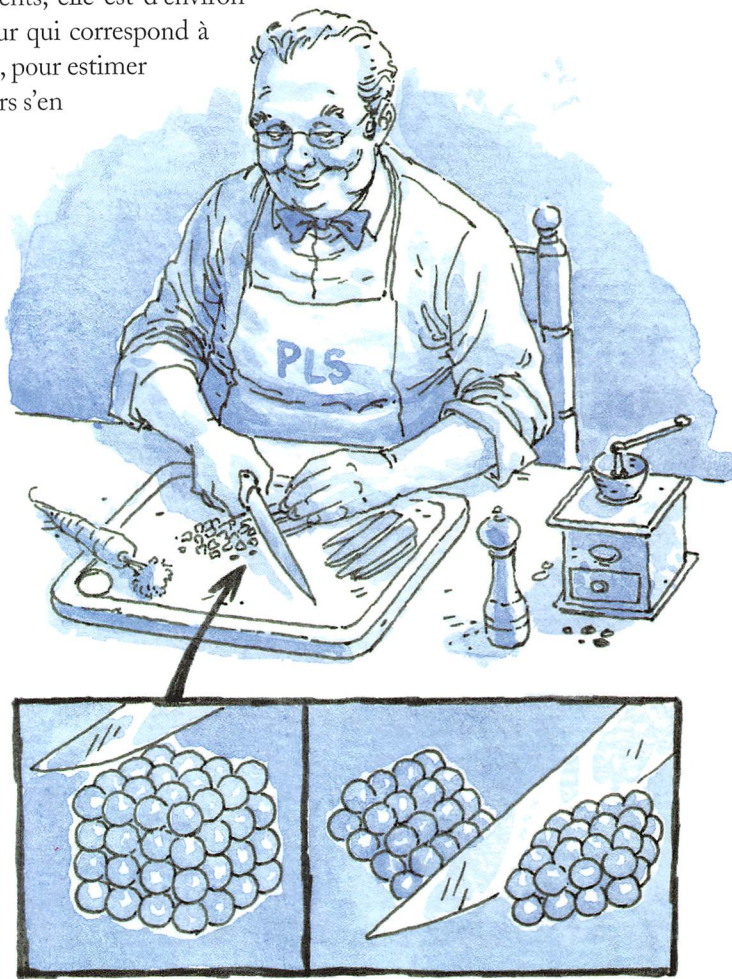
L'esprit confiant, revenons à nos roches : quelle superficie crée-t-on lorsqu'on les pulvérise ? Imaginons un grain cubique. Quand on le coupe en deux dans chacune des trois dimensions, on obtient huit morceaux de taille moitié de la taille initiale. L'aire de chaque morceau est alors le quart de l'aire du cube initial, et l'aire totale des huit grains est le double de l'aire initiale. Ainsi, la superficie totale d'une poudre est inversement proportionnelle à la taille de ses constituants.

Couper n'est pas broyer

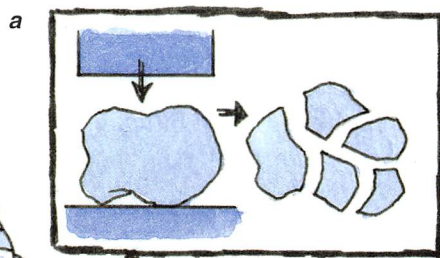
Si l'on part d'une tonne de roche, soit environ un volume de un demi-mètre cube de 80 centimètres de côté, et qu'on la réduit en grains de dix micromètres, on obtient une superficie finale de près de 300 000 mètres carrés. D'après notre estimation de cinq joules par (double) mètre carré, l'énergie requise pour ce broyage serait de l'ordre de 0,75 million de joules, soit 0,2 kilowattheure par tonne de roche traitée. Qu'en est-il en pratique ?

Tout d'abord, pour caractériser les poudres, les ingénieurs n'utilisent pas le diamètre des grains, mal défini car les formes des granules sont variées, mais la superficie totale par unité de volume, nommée finesse. Pour les ciments, elle est d'environ 3 200 centimètres carrés par gramme, valeur qui correspond à ce que nous avons évalué ci-dessus. Ensuite, pour estimer l'énergie nécessaire au broyage, les ingénieurs s'en remettent à des lois empiriques.

L'une d'elles, établie par Peter von Rittinger en 1867, stipule que l'énergie requise est proportionnelle à l'aire créée. Les caractéristiques des broyeurs industriels le confirment : un matériau placé dans un broyeur fonctionnant à puissance



1 En découpant un solide, on augmente sa superficie totale. L'énergie requise pour la découpe est proportionnelle au nombre de liaisons brisées entre atomes, nombre lui-même proportionnel à la superficie créée. Elle est de quelques joules pour un (double) mètre carré.



2 Pour fragmenter des solides, divers procédés sont possibles : percussion *[a]*, impacts multiples dans un broyeur à boulets *[b]*, cisaillement avec des couteaux, écrasement et frottement avec une meule *[c]*, etc. L'énergie nécessaire au broyage est quelque 100 fois supérieure à celle estimée en supposant une découpe par des lames parfaitement aiguisées et précises : les contraintes mécaniques déforment la matière avant de la briser, et l'énergie ainsi stockée se dissipe sous forme de chaleur au moment de la fragmentation.

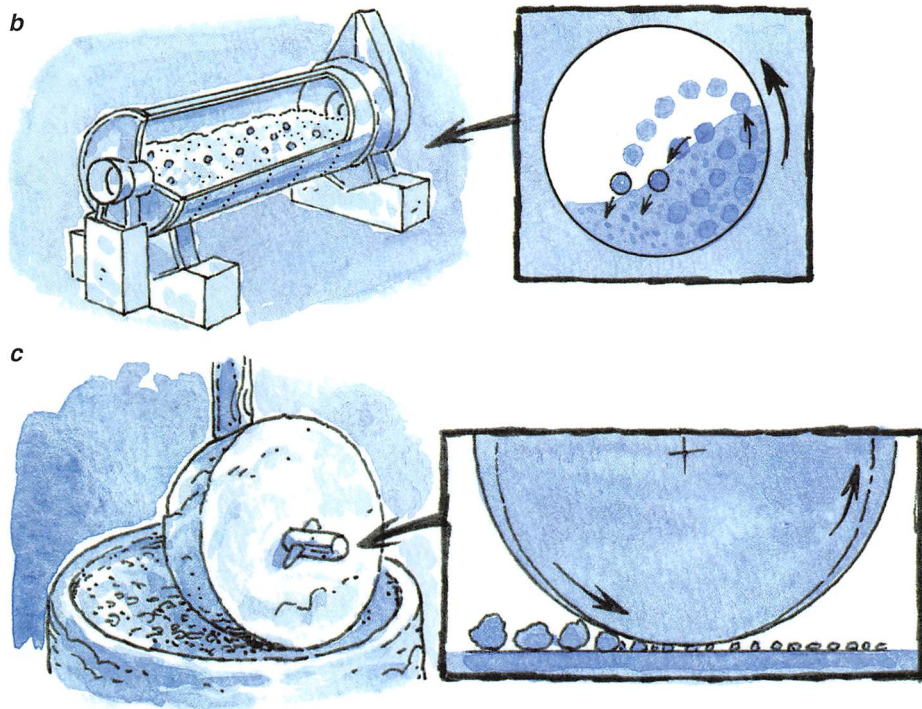


constante voit sa finesse augmenter linéairement en fonction du temps. En d'autres termes, la superficie créée par unité de temps ne dépend pas de la taille des grains. Il semble donc que nous ayons qualitativement compris ce qui se passe. Cependant, les broyeurs des cimenteries consomment 20 à 50 kilowattheures par tonne, ce qui est 100 fois plus que notre estimation.

Beaucoup d'énergie perdue en chaleur

Pourquoi faut-il beaucoup plus d'énergie ? Parce que la fragmentation des roches ne se fait pas avec un scalpel parfaitement aiguisé et précis qui découperait la matière simplement en écartant les atomes. Elle s'opère suivant différents modes, tous fondés sur de fortes sollicitations mécaniques : écrasement (concasseurs à mâchoires), cisaillement (couteaux), impacts (broyeurs à boulets), frottements (meules), etc. Les forces de contact qui les accompagnent créent au sein de la matière des contraintes inégalement réparties. Il en résulte des déformations d'abord élastiques, correspondant à de simples mouvements réversibles d'atomes, puis plastiques lorsque les cristallites glissent les uns sur les autres, et qui vont jusqu'à la rupture lorsque la contrainte est assez élevée.

À ce moment, l'énergie qu'a emmagasinée la déformation est libérée et rompt les liaisons : le grain se fragmente. Cependant, cette énergie est en général bien supérieure à ce qui est nécessaire, si bien que sa plus grande part est dissipée en chaleur. Dans ce mécanisme, la présence de défauts et de fissures dans le matériau joue un rôle essentiel, car leur propagation facilite la fragmentation.



Par ailleurs, l'énergie fournie étant stockée en volume, si l'on travaille avec la même quantité de matière, chaque étape de division entraîne la même dépense d'énergie. On en déduit que l'énergie totale du broyage est proportionnelle au logarithme de la taille des grains: c'est la loi de Kick (1885), qui décrit assez bien le concassage grossier, jusqu'à des tailles centimétriques. En deçà, la loi de Rittinger – proportionnalité entre énergie fournie et aire créée – se révèle plus adéquate (à condition de ne pas tenir compte de notre estimation numérique!).

D'expérience, il arrive cependant un moment où la finesse du matériau broyé n'évolue plus. Sous l'effet de forces électrostatiques (les violentes étapes de la fragmentation chargent les poudres), les fines particules s'agglomèrent dès leur production et viennent recouvrir les corps broyants. Le cimentier, à l'affût d'économies d'énergie, utilise alors des adjuvants pour pallier ces effets.

Ces adjuvants agissent de plusieurs façons. Adsorbés à la surface du grain, ils diminuent localement sa cohésion et rigidifient la surface, la rendant plus cassante. Par ailleurs, ces molécules, qui sont polaires, atténuent les forces de cohésion entre les grains et neutralisent les effets électrostatiques, ce qui retarde la réagglomération des poudres et le recouvrement des corps broyants. À énergie fournie constante, elles peuvent porter la finesse du ciment jusqu'à 4500 centimètres carrés par gramme, voire plus; ou, à finesse donnée, réduire le temps de broyage et la consommation d'énergie d'environ dix pour cent. Pas de quoi sauver la planète.



Coup de froid ou coup de chaud ?



Eau chaude qui gèle plus vite que l'eau froide,
geyser, cocotte minute, rosée et brouillard...

L'eau dans tous ses états.



Shutterstock / Jerry Sharp

Vapeurs sous pression

La température d'ébullition d'un liquide dépend de la pression. Une propriété à l'œuvre tant dans les autocuiseurs que dans les geysers.

Le geyser *Old Faithful* dans le parc de Yellowstone aux États-Unis.

Dans un autocuiseur, l'eau sous pression bout à plus de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pourquoi n'atteint-on pas une telle température à la pression atmosphérique? Comme nous le verrons, les effets de la pression sur la température d'ébullition de l'eau expliquent l'intérêt des autocuiseurs, mais aussi le beau spectacle des geysers. Cela suppose d'abord de comprendre l'équilibre entre un liquide et sa vapeur.

Pour ce faire, il faut se placer à l'échelle microscopique. Considérons de l'eau liquide placée en petite quantité dans un récipient où l'on a fait le vide. En raison des forces de cohésion entre les molécules d'eau, le liquide garde son volume et l'essentiel du récipient est vide. Au sein du liquide, les molécules d'eau sont agitées de mouvements d'autant plus rapides que la température est élevée. Même à basse température, certaines molécules ont des vitesses suffisantes pour vaincre les forces intermoléculaires. Lorsque ces molécules sont au voisinage de la surface, elles s'extraient du liquide. Peu à peu, le récipient s'emplit ainsi de vapeur.

Lorsque les molécules évaporées viennent frapper le liquide, il arrive qu'elles cèdent à ce dernier une partie de leur énergie: elles ne sont alors plus assez rapides pour s'éloigner de la surface et retournent dans le liquide. C'est la condensation, le processus inverse de l'évaporation. À température donnée, le nombre moyen de molécules qui quittent le liquide à chaque instant est toujours le même; en revanche, le nombre de molécules qui se condensent est proportionnel au nombre de molécules qui viennent frapper la surface, et donc à la pression de la vapeur.

Pour une valeur bien précise de la pression, la «pression de vapeur saturante», évaporation et condensation se compensent. Le nombre de molécules dans chaque phase est en moyenne constant. Quand la pression de la vapeur est inférieure à la pression de vapeur saturante, du liquide s'évapore; quand elle lui est supérieure, de la vapeur se condense. Le

nombre de molécules susceptibles de quitter le liquide augmente rapidement avec la température. Il en est donc de même de la pression de vapeur saturante. Celle-ci vaut une atmosphère pour de l'eau à 100°C, mais dépasse 15 atmosphères pour 200°C et ne vaut qu'un quarantième d'atmosphère à 21°C. C'est pourquoi de l'eau chauffée dans une casserole non couverte bout à 100°C, c'est-à-dire juste quand la pression de vapeur saturante est égale à la pression atmosphérique.

Ébullition: 100°C à l'air libre...

Dans un récipient d'eau qu'on chauffe, que se passe-t-il lorsque naît, sur une paroi en général, une petite bulle de vapeur? La pression dans cette bulle est égale à la pression de vapeur saturante. Par conséquent, si la température est inférieure à 100°C, cette pression est inférieure à une atmosphère, la pression de l'eau. La bulle se contracte et disparaît.



1 Dans un autocuiseur, la soupape maintient la pression de la vapeur d'eau, donc celle du liquide, à moins de deux atmosphères. Cette valeur correspond à la «pression de vapeur saturante» de l'eau à 121°C. Au-dessous de cette température,

les éventuelles bulles de vapeur d'eau disparaissent, car leur pression interne est inférieure aux deux atmosphères qu'elles subissent. À 121°C, la pression interne des bulles atteint deux atmosphères et les bulles subsistent : c'est l'ébullition.

2 Un peu d'eau chauffée dans une canette jusqu'à ébullition permet de chasser l'air et de le remplacer par de la vapeur. Si l'on renverse rapidement la canette sur une bassine d'eau froide, la vapeur se condense. Cela provoque une dépression, et la canette s'écrase. Le même effet de dépression explique pourquoi on ne peut pas ouvrir un autocuiseur refroidi sans avoir d'abord libéré la soupape.



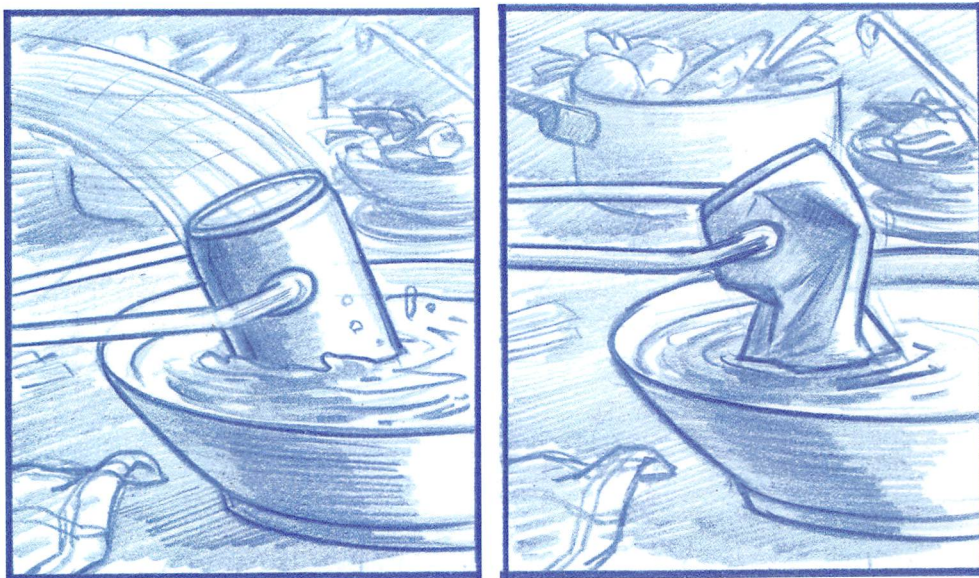
À 100°C , un équilibre est possible et la petite bulle, devenue stable, s'élève jusqu'à crever en surface en libérant toute sa vapeur : c'est l'ébullition.

En revanche, à plus de 100°C , la bulle grossit vite, car sa pression interne dépasse celle de l'eau. Cette situation se produit parfois dans un four à micro-ondes, où le chauffage a lieu dans tout le volume du liquide. Au centre du récipient, l'eau ne trouve pas le germe ou l'impureté qui lui permettrait de former une bulle, et la température peut y dépasser 100°C de plusieurs degrés. Mais le moindre choc apporte l'énergie nécessaire à la naissance d'une bulle, qui enfle alors rapidement et entraîne des projections d'eau bouillante.

Une illustration spectaculaire de l'ébullition est le geyser qui, comme l'*Old Faithful*, l'une des principales attractions du parc américain de Yellowstone, souffle un jet de vapeur à intervalles réguliers. Dans ces terres volcaniques, l'eau des profondeurs se rassemble dans des puits où elle s'échauffe. Au fond de ces puits, la pression hydrostatique, due à la colonne d'eau qui les surmonte, est bien supérieure à une atmosphère. Il ne s'y forme donc pas de bulles à 100°C , et l'eau peut atteindre les 300°C .

...mais 121°C en autocuiseur

Régulièrement, quelques bulles de gaz carbonique apparaissent dans la colonne d'eau. En remontant, ces bulles gonflent et finissent par occuper un volume important. Le conduit est alors partiellement vidé de son liquide, et la pression au fond devient inférieure à ce qu'elle était lorsque le conduit était plein. Dans ce cas, les bulles naissantes de vapeur d'eau peuvent grossir et une réaction en chaîne s'enclenche : l'eau des profondeurs bout, libère plus de bulles, ce qui diminue encore la pression, etc. En surface, il ne reste plus qu'à admirer l'éruption de vapeur et de gouttelettes qui s'ensuit... et à attendre un nouveau cycle de remplissage des puits et d'échauffement-ébullition de leurs eaux.

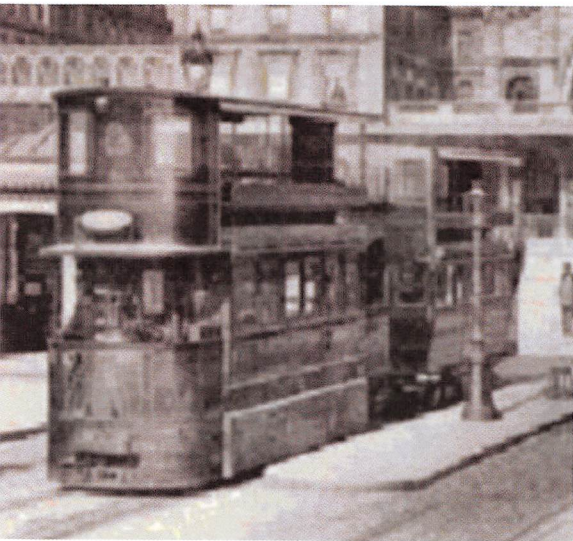


Puisqu'il est difficile de dépasser les 100°C à la pression atmosphérique, il faut davantage de pression si l'on veut de l'eau plus chaude. C'est le rôle d'un autocuiseur. Dans un tel récipient, la vapeur s'accumule grâce au couvercle hermétique et la pression à l'intérieur augmente. Lorsqu'elle atteint deux atmosphères, une soupape laisse s'échapper un peu de vapeur, afin que la pression reste constante. Très vite, l'autocuiseur ne contient plus (en sus des aliments!) que de la vapeur d'eau en équilibre avec le liquide, à 121°C – la température pour laquelle la pression de vapeur saturante est égale à deux atmosphères. Comme la vitesse des réactions chimiques de cuisson double à peu près tous les dix degrés au-delà de 100°C , on divise ainsi par quatre les temps de cuisson!

La cuisson achevée, pour faire baisser la pression dans l'autocuiseur, on laisse celui-ci refroidir. On peut même accélérer son refroidissement en le plaçant sous un filet d'eau froide. Or si l'on pouvait regarder à l'intérieur, on constaterait que ce refroidissement active l'ébullition de l'eau! Pourquoi? Comme la vapeur se condense sur les parois froides, la pression chute brutalement à l'intérieur, ce qui permet aux bulles de vapeur de se former.

Une fois la température ambiante atteinte, il est difficile de retirer le couvercle sans ouvrir la soupape. Pourquoi? À 21°C , la pression à l'intérieur ne vaut plus qu'un quarantième d'atmosphère. Autrement dit, les forces atmosphériques qui appuient sur l'extérieur des parois ne sont pas contrebalancées par les forces de pression internes. C'est grâce à ses parois robustes que l'autocuiseur ne s'effondre pas sur lui-même. Une expérience simple montre ce qui se passerait si l'autocuiseur était moins résistant. On place un fond d'eau dans une canette de soda. On chauffe pour porter le liquide à ébullition et on attend quelques dizaines de secondes, le temps que la vapeur d'eau formée ait chassé tout l'air contenu dans la canette. On retourne alors celle-ci sur une bassine d'eau froide. Avant même que le liquide ait le temps de pénétrer, la vapeur d'eau se condense, la pression dans le récipient chute brutalement et la canette s'écrase sur elle-même.

L'air comprimé revient



Après des décennies d'oubli, l'utilisation de l'air comprimé redevient d'actualité pour stocker de l'énergie.

Le tramway nantais Mekarowski à air comprimé, vers 1870.

S stocker de l'énergie en comprimant de l'air, pourquoi pas ? Des jeux d'enfants, tels que fusées ou carabines à eau, utilisent ce moyen. Mais est-ce bien sérieux ? Après une période florissante au XIX^e siècle, ce mode de stockage est tombé en désuétude en raison d'un mauvais rendement. Il revient pourtant à l'actualité et les projets foisonnent. Comment adapter la compression de l'air à une utilisation moderne ?

L'idée d'utiliser l'énergie de l'air comprimé est ancienne et brille par sa simplicité. D'abord, on comprime l'air contenu dans une enceinte à des pressions élevées. Ensuite, on le détend selon les besoins, la différence de pression entre l'intérieur de l'enceinte et l'extérieur étant mise à profit pour faire fonctionner une turbine, un moteur, etc.

Encombrement et échauffements

Premier problème : le volume requis pour stocker une quantité donnée d'énergie est bien plus important avec l'air comprimé que pour d'autres formes d'énergie. On calcule qu'au voisinage de la température ambiante et avec des rapports de compression de dix (en volume), la détente de un mètre cube d'air à 100 atmosphères peut libérer 25 mégajoules, soit l'équivalent d'à peine un litre d'essence ! Un trajet urbain de quelques dizaines de kilomètres nécessiterait donc un réservoir de plusieurs mètres cubes. C'est pourquoi les tramways *Mekarowski*, qui ont roulé à Nantes et à Paris dans les années 1880, avaient une faible autonomie (15 kilomètres) et devaient être fréquemment ravitaillés en air comprimé.

Le second problème est bien connu de tous, grâce à la pompe à vélo. Un gaz que l'on comprime s'échauffe. Pourquoi ? Lorsqu'un piston se déplace dans un cylindre pour

compresser le gaz, il a le même effet sur les molécules de l'air qu'une raquette sur une balle de tennis : puisqu'il vient au-devant des molécules, les collisions avec elles leur fait gagner de la vitesse (voir la figure 1). Les molécules étant beaucoup plus rapides que le piston, l'énergie transférée à chaque choc est faible, mais, les collisions étant très nombreuses, le gain total d'énergie peut être important. Puis, au gré des collisions intermoléculaires, la vitesse moyenne des molécules du gaz s'élève, et avec elle la température, qui mesure l'agitation thermique.

Inversement, lors d'une détente, le gaz cède son énergie au piston et se refroidit. Prenons de l'air à pression atmosphérique et à 15 °C, et appliquons une compression adiabatique (c'est-à-dire sans aucun échange de chaleur) qui diminue le volume par un facteur dix : on obtiendra de l'air à une pression de 25 atmosphères et à une température de l'ordre de 450 °C.

Ces échauffements (ou refroidissements) peuvent atteindre des centaines de degrés pour des taux de compression importants, ce qui pose des difficultés techniques. Le stockage de l'air sous pression nécessite donc de le refroidir à la compression et de le réchauffer à la détente. Pour un même volume, le gaz sera plus froid à la détente que lors de la compression ; la pression exercée sur le piston sera plus faible et le travail mécanique récupéré sera inférieur à celui qui avait été fourni. Dans ces conditions, on montre que l'on récupérera moins de la moitié de l'énergie investie.



1 L'air que l'on comprime s'échauffe. Une molécule d'air qui vient frapper le piston acquiert en rebondissant un supplément de vitesse égal à deux fois le vecteur vitesse du piston. Cumulé sur un grand nombre de collisions, ce processus augmente la température du gaz.

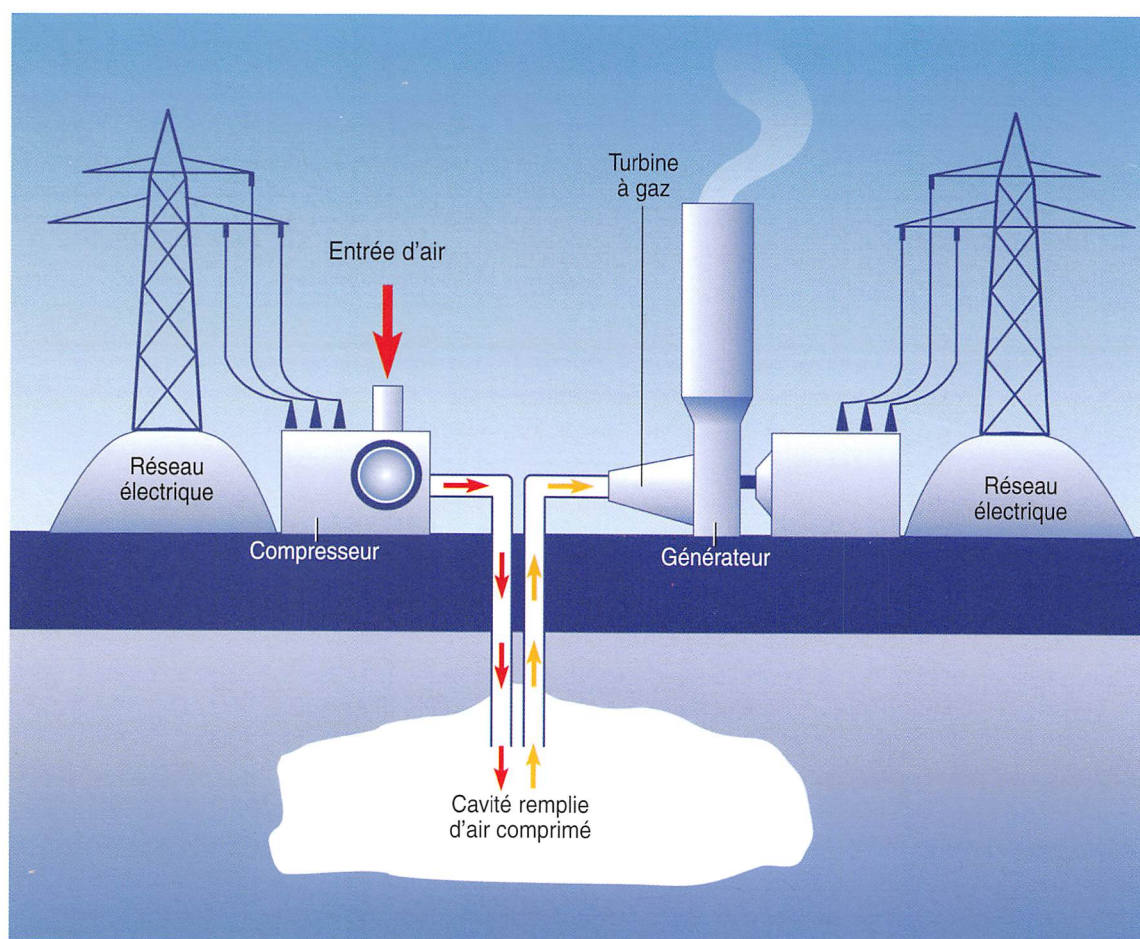
Puissance et propreté

Si les efforts de recherche ont redoublé ces dernières années pour cette forme de stockage d'énergie, c'est que ses avantages répondent aux préoccupations modernes : simplicité des mécanismes souvent associée à un faible coût, sécurité (l'air n'explose pas !), propreté (pas d'émissions nocives) et une puissance délivrée pouvant être très élevée (il suffit de régler le débit d'air).

Ainsi, la centrale allemande de Huntorf, en service depuis 1978, délivre une puissance de près de 300 mégawatts pendant trois heures. Sa mise en route rapide (quelques minutes) lui permet de suppléer aux pics de consommation en attendant que les

centrales thermiques prennent le relais. La compression est effectuée aux heures où il y a surproduction d'électricité ou quand celle-ci est peu chère. Deux anciennes mines de sel ont été converties en réservoirs souterrains de 310 000 mètres cubes, où l'air est comprimé jusqu'à 60 atmosphères. Cet air comprimé alimente une turbine à gaz. Préchauffé dans un récupérateur de chaleur qui utilise les gaz chauds de combustion de la turbine en fonctionnement, l'air sous pression est mélangé ensuite avec du fuel ou du gaz pour être brûlé et alimenter la turbine.

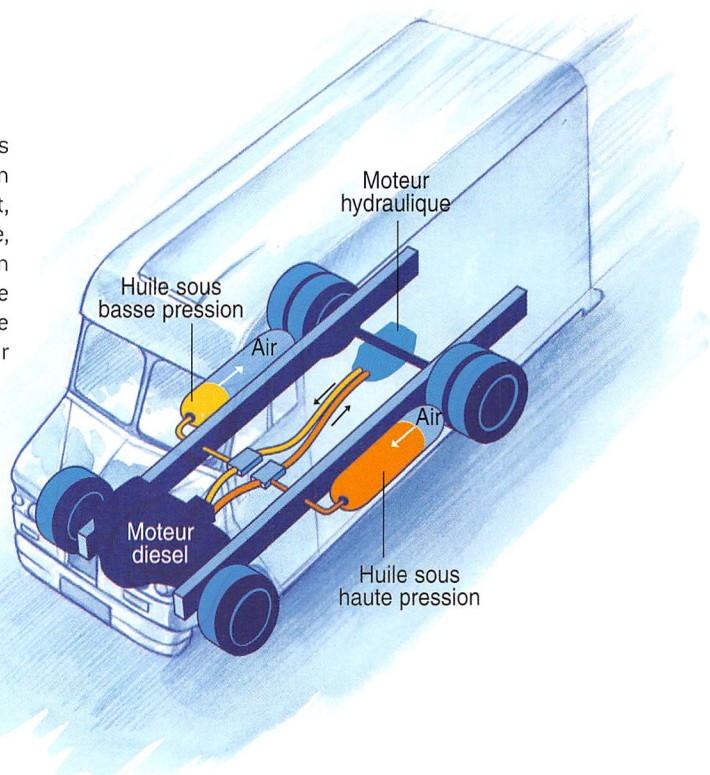
Ce procédé (voir la figure 2) multiplie par près de trois la puissance produite par rapport à une turbine à gaz classique, qui utilise les deux tiers de sa puissance pour précompresser l'air de combustion. De nouveaux réservoirs, où la chaleur dégagée au moment de la compression est stockée dans de la céramique, du béton ou de la fonte pour être récupérée



2 Le rendement d'une turbine à gaz peut être amélioré grâce à l'utilisation d'air comprimé. Durant les phases de surproduction d'électricité, un compresseur comprime de l'air puisé à l'extérieur et le stocke (flèches rouges) dans une cavité souterraine. Une

partie de cet air sous pression en est extraite (flèches jaunes) et mélangée au gaz qui brûle dans la turbine. Pour une même consommation, la puissance électrique produite est le triple de celle d'une turbine à gaz classique.

3 Certains véhicules de livraison ont des systèmes de motorisation hybrides utilisant l'air comprimé. Un moteur diesel met sous pression l'huile dans un circuit, qui actionne un moteur hydraulique. Lors d'un freinage, le circuit hydropneumatique emmagasine l'énergie en comprimant l'air de l'un des réservoirs. Dans une phase d'accélération [ici représentée], le système laisse cet air se détendre, ce qui actionne le moteur hydraulique.



au moment de la détente, sont à l'étude. Des rendements de 70 pour cent sont promis...

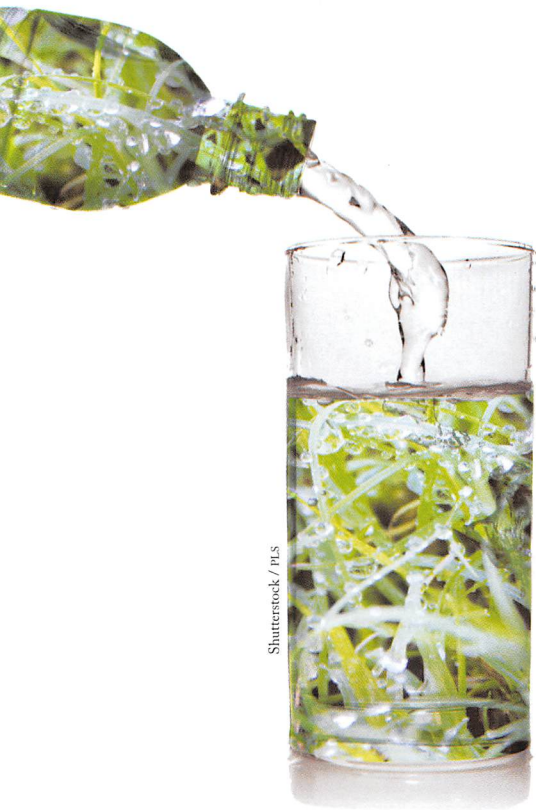
Une autre possibilité est de stocker la chaleur... dans l'atmosphère! Si l'on favorise les échanges thermiques du gaz comprimé avec le milieu extérieur, la température du gaz, et donc l'énergie cinétique des molécules, reste

constante. À mesure que l'on comprime, la chaleur produite est intégralement cédée au milieu extérieur. L'énergie semble perdue? Il n'en est rien. Car lors de la détente, le mécanisme inverse opère : le gaz absorbe de la chaleur en provenance du milieu extérieur et récupère ainsi toute la chaleur cédée lors de la compression, qui est ensuite convertie en travail. Avec une compression lente et des échangeurs de chaleur présentant une grande surface, les rendements deviennent satisfaisants.

Comme un gaz change trop facilement de volume, on préfère des solutions hydropneumatiques où la pression de l'air est transmise par l'intermédiaire d'un fluide hydraulique (de l'huile). Selon des études récentes, on pourrait atteindre l'optimum du rendement, près de 70 pour cent, avec des réservoirs en acier standard et une pression de l'ordre de 200-300 atmosphères. Le problème est qu'il faut des réservoirs pour conserver l'huile, d'où un volume et un poids élevés. C'est pourquoi il n'existe pas encore de véhicules mus uniquement par ce procédé.

Cependant, de tels systèmes conviennent bien à des applications exigeant des puissances élevées et des cycles de compression-détente nombreux et rapides. Tel est le cas des véhicules de livraison. Ainsi, la Société UPS s'est récemment équipée de camions à moteurs hybrides (voir la figure 3). La propulsion est assurée par un moteur hydraulique alimenté en huile sous pression. En régime de croisière, la mise sous pression de l'huile est assurée par un moteur thermique (diesel).

Lors du freinage, le moteur hydraulique fonctionne en mode inverse et comprime le gaz contenu dans un réservoir. L'énergie ainsi stockée est récupérée lors du démarrage. L'avantage est double : l'énergie n'est pas perdue lors du freinage et le moteur thermique n'est sollicité que dans les régimes où son efficacité est maximale. On réduit ainsi la consommation de carburant de 30 à 50 pour cent. Et de nombreux ingénieurs (Guy Nègre en France, Angelo Di Pietro en Australie, etc.) affirment avoir conçu des moteurs pneumatiques encore plus efficaces...



Un verre de rosée ou de brouillard ?

L'atmosphère contient de la vapeur d'eau en abondance. Récupérée, elle représenterait une source alternative d'eau potable.

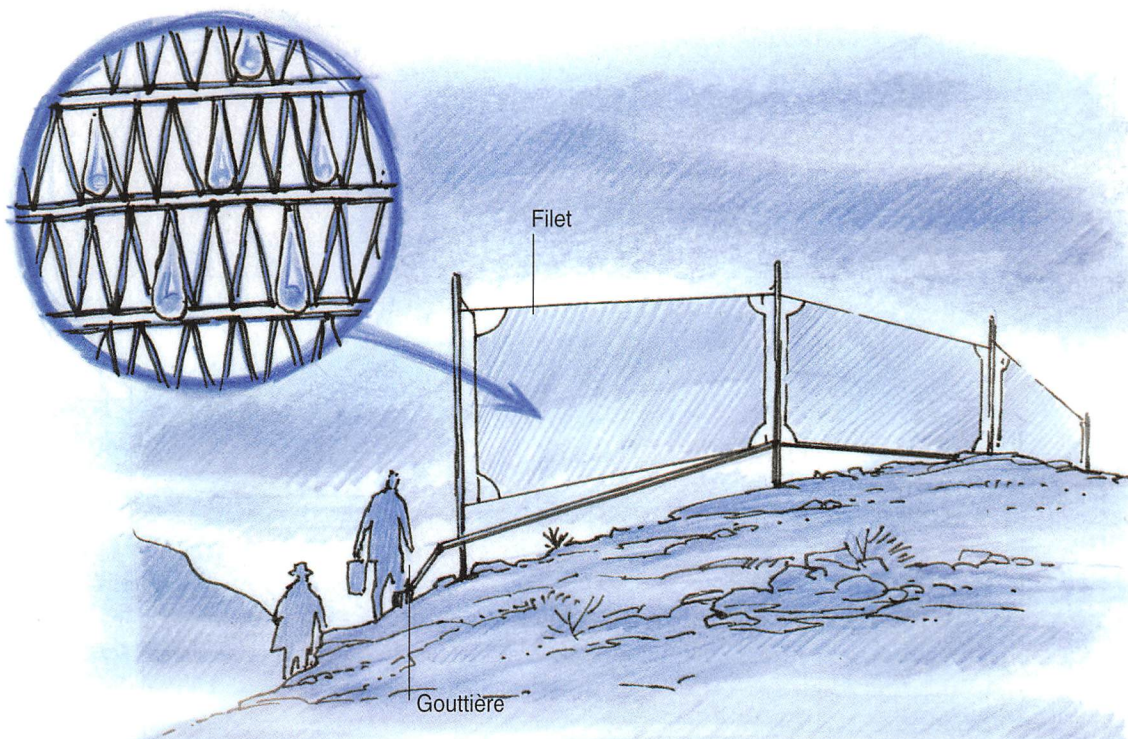
Shutterstock / PLS

Si l'eau potable n'est pas équitablement répartie sur notre globe sous sa forme liquide, la vapeur d'eau est omniprésente dans l'atmosphère. Les brouillards et la rosée en témoignent. Même dans le désert le plus aride, la vapeur d'eau est là. Et de nouvelles stratégies se développent pour la récupérer : filets à brouillard, récupérateurs de rosée... Quelles sont les promesses et les limites de ces techniques, qui mettent en jeu la physique de la condensation ?

Que d'eau, que d'eau...

La teneur atmosphérique en vapeur d'eau varie de quatre grammes par mètre cube dans les déserts à plus de 20 sous les tropiques au bord de l'océan, avec une dizaine de grammes par mètre cube dans les pays tempérés. Cela signifie que sur une épaisseur de 100 mètres d'atmosphère, on a un kilogramme de vapeur d'eau par mètre carré au sol. Pour la France, cela représente un potentiel de 550 millions de mètres cubes d'eau, soit la consommation domestique annuelle de 15 millions de personnes !

Cette eau reste sous forme vapeur tant que sa teneur ne dépasse pas un certain seuil ; au-delà, l'excès se condense. Ce seuil varie très vite avec la température. Entre -20°C et 40°C , il double environ tous les dix degrés : à 0°C , il est de 4,2 grammes de vapeur d'eau par mètre cube, à 10°C de 7,6 grammes et à 20°C de 14,7 grammes. Pour faire condenser la vapeur d'eau et obtenir de l'eau liquide, il suffit donc que la température diminue, de façon que la concentration en eau dépasse le seuil. Il se forme alors du brouillard ou des nuages.



1 L'eau liquide en suspension dans un brouillard peut, dans les régions appropriées, être recueillie à l'aide de filets à mailles serrées placés face aux vents dominants.

Comment la température peut-elle baisser? Une première cause, directe, est le refroidissement nocturne de l'atmosphère. Une seconde cause, indirecte, est due à des mouvements ascendants (convection naturelle, l'air chaud étant moins dense) ou à l'effet combiné du vent et des montagnes. En s'élevant, l'air se détend et se refroidit, d'où condensation de l'humidité en brouillards ou nuages.

Constitué de gouttelettes d'environ 1 à 40 micromètres de diamètre, le brouillard contient de 0,05 gramme à quelques grammes d'eau liquide par mètre cube. Une eau qui ne tombe pas, contrairement à la pluie : les gouttelettes sont si petites qu'elles restent longtemps en suspension.

Attraper l'eau au filet

Pour récupérer cette eau, il faut provoquer son dépôt sur un solide. L'idée est mise en pratique depuis quelques années dans les régions semi-arides où des montagnes s'élèvent à proximité de la côte : les pluies y sont rares, mais l'humidité élevée, les brouillards fréquents et les vents omniprésents. On utilise pour cela des filets à mailles serrées, placés face aux vents dominants (*voir la figure 1*). Après un projet pilote au Chili en 1987, les initiatives se sont multipliées. Ainsi, dans le parc régional de Teno, aux Canaries, on recueille en moyenne trois à cinq litres d'eau par mètre carré de filet et par jour, avec des pointes à neuf litres – une source d'appoint non négligeable pour les populations.

Et s'il n'y a pas de brouillard ou de pluie? Cela signifie que la teneur de l'air en eau ne dépasse pas naturellement le seuil de condensation. Il faut donc abaisser le seuil, en refroidissant l'air ambiant ou en le mettant en contact avec une surface froide (*voir la figure 2*).

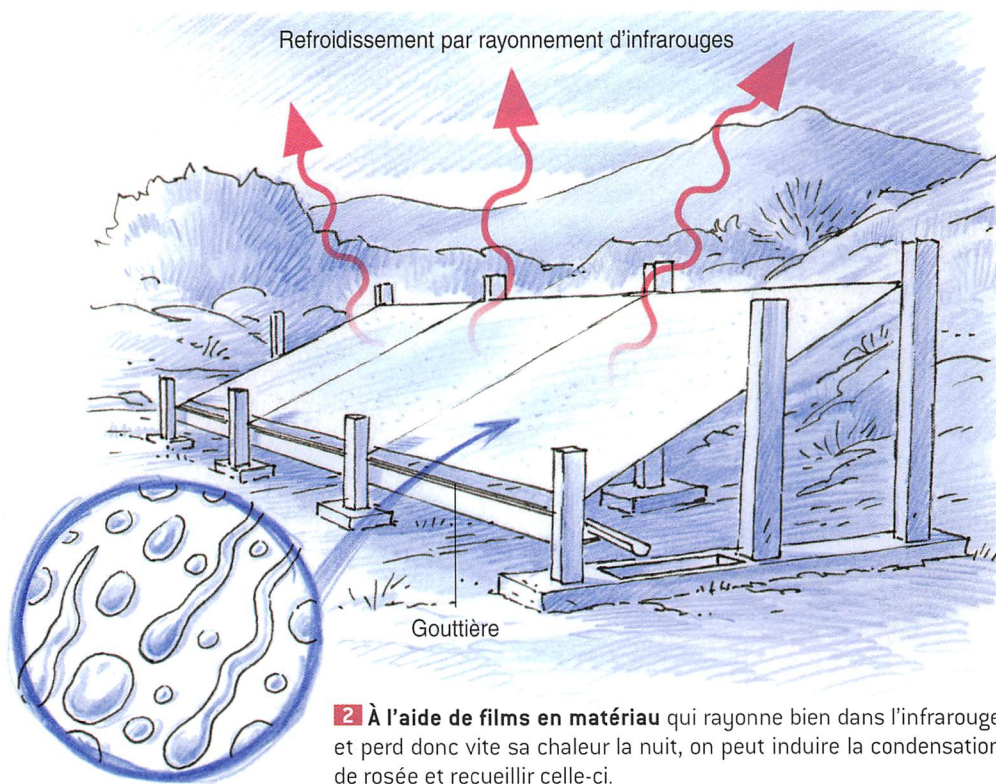
On le constate l'été : une bouteille sortie du réfrigérateur se recouvre rapidement de gouttelettes d'eau. C'est aussi pourquoi un climatiseur exige une évacuation d'eau, même quand on a l'impression qu'il fait sec.

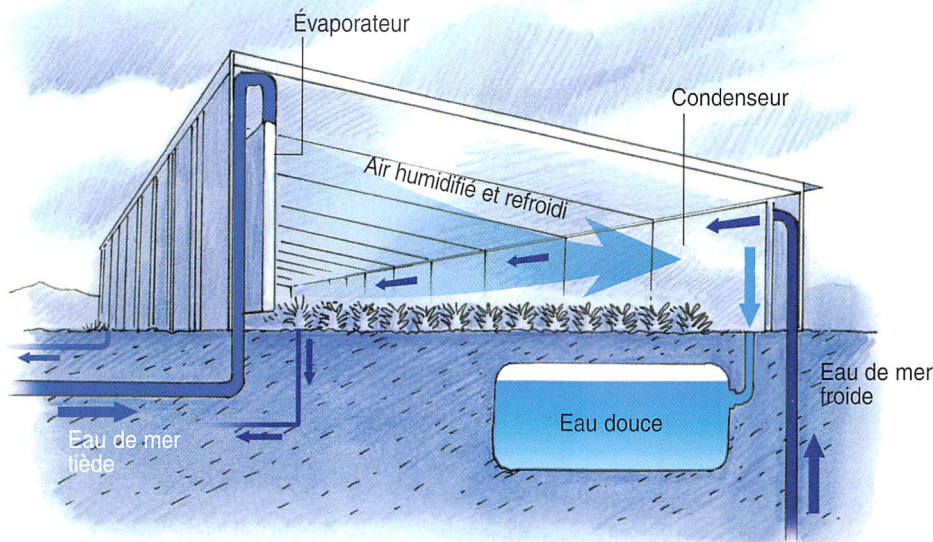
Cette apparente facilité ne doit cependant pas nous leurrer : former des gouttelettes d'eau est difficile. La condensation peut être retardée sachant que, pour condenser, l'eau a besoin d'un germe, par exemple une poussière, ou d'un support mouillant – l'idéal étant un support sur lequel l'eau condense en film et non en gouttelettes.

Recueillir la rosée du matin

Par ailleurs, la condensation de l'eau libère énormément d'énergie – 2450 joules par gramme –, ce qui élève la température ambiante, eau comprise. Cette chaleur peut stopper la condensation et il faut donc l'évacuer, mais cela consomme de l'énergie. Un appareil commercial nommé *RainMaker* (faiseur de pluie) produit 25 litres d'eau par jour en aspirant et refroidissant chaque seconde 0,1 mètre cube d'air à 60 pour cent d'humidité et à 27 °C. Cela correspond à un coût énergétique de 1600 kilowattheures par mètre cube d'eau potable, chiffre qui est réduit à 500 grâce à une pompe à chaleur. Évidemment, ce coût reste très élevé.

Comment se passer d'un apport d'énergie ? En s'inspirant de la rosée. Si la vapeur d'eau se condense sur les brins d'herbe en fin de nuit, c'est que ce support devient plus froid que l'atmosphère ambiante, grâce au refroidissement par rayonnement. Toutes les surfaces sont





3 Des serres productrices d'eau douce. L'eau de mer tiède s'évapore [à gauche], ce qui refroidit et humidifie l'air de la serre. Parvenu à l'autre bout de la serre [à droite], l'air se sature en vapeur d'eau grâce à un second évaporateur

(non représenté). Là, cette humidité se condense sur des plaques refroidies grâce à de l'eau de mer puisée en profondeur, donc froide – un condenseur – ; elle est ensuite recueillie dans le réservoir.

en effet susceptibles de se refroidir en émettant à température ambiante des infrarouges, à raison d'environ 400 watts par mètre carré. Dans la journée, l'échauffement dû au Soleil l'emporte largement (près de 1000 watts par mètre carré au sol), mais la nuit ne subsiste que l'émission infrarouge ambiante : si le ciel est bien dégagé, l'émission infrarouge d'un objet n'est pas compensée dans la direction du ciel (tel n'est pas le cas avec un ciel nuageux, c'est pourquoi il n'y a de rosée que par nuit claire).

On peut ainsi obtenir des puissances de refroidissement voisines de 100 watts par mètre carré, ce qui permet, dans le cas idéal où toute l'énergie sert à condenser la vapeur d'eau, d'obtenir de l'ordre de un litre de rosée par mètre carré et par jour. Un condensateur radiatif a ainsi été mis au point récemment par une équipe du CEA dirigée par Daniel Beysens. Constitué de films de polyéthylène dans lesquels sont incorporées des microbilles de dioxyde de titane (TiO_2), qui absorbent peu dans le visible et émettent beaucoup dans l'infrarouge, il fournit 0,6 litre d'eau par mètre carré et par jour pour un coût minime (de l'ordre de un euro le mètre carré de film).

Pour améliorer le rendement, il est aussi possible d'enrichir l'air en vapeur d'eau par l'évaporation d'eau non potable, de l'eau de mer par exemple. De quoi combiner récupération de rosée et dessalement solaire ! De tels dispositifs se développent dans les pays du Moyen-Orient à proximité des côtes.

Plusieurs de ces projets mettent à profit le refroidissement de l'air dû à l'évaporation pour pratiquer la culture sous serre (voir la figure 3). De l'eau de mer tiède (puisée en surface) est évaporée à l'entrée de la serre par un flux d'air extérieur. Cet air se refroidit et se charge en humidité, se répand dans la serre et atteint un second évaporateur qui le sature en vapeur d'eau. Là, grâce à un condenseur refroidi par de l'eau de mer froide, puisée en profondeur, cette humidité (non salée) se condense et donne de l'eau douce. Un système ingénieux qui humidifie la serre, contrôle sa température, produit de l'eau douce, diminue les besoins en irrigation et récupère l'humidité transpirée par les plantes !



Les chaufferettes chimiques

La solidification retardée d'un liquide offre un moyen de stocker de la chaleur et de la restituer au moment voulu.

La neige tombe, les mains commencent à s'engourdir et le refuge est encore loin. Le randonneur sort alors de son sac à dos une pochette en plastique, remplie d'un liquide transparent, et appuie sur un petit disque métallique placé à l'intérieur: le liquide commence à se solidifier tout en dégageant une douce chaleur. Le nom de «chaufferette chimique» donné à ce dispositif évoque une réaction chimique. Pourtant, son fonctionnement met en jeu un phénomène purement physique – la surfusion –, qui permet de stocker de l'énergie sous forme thermique et de la restituer quand on le souhaite.

Stocker de la chaleur dans un mur

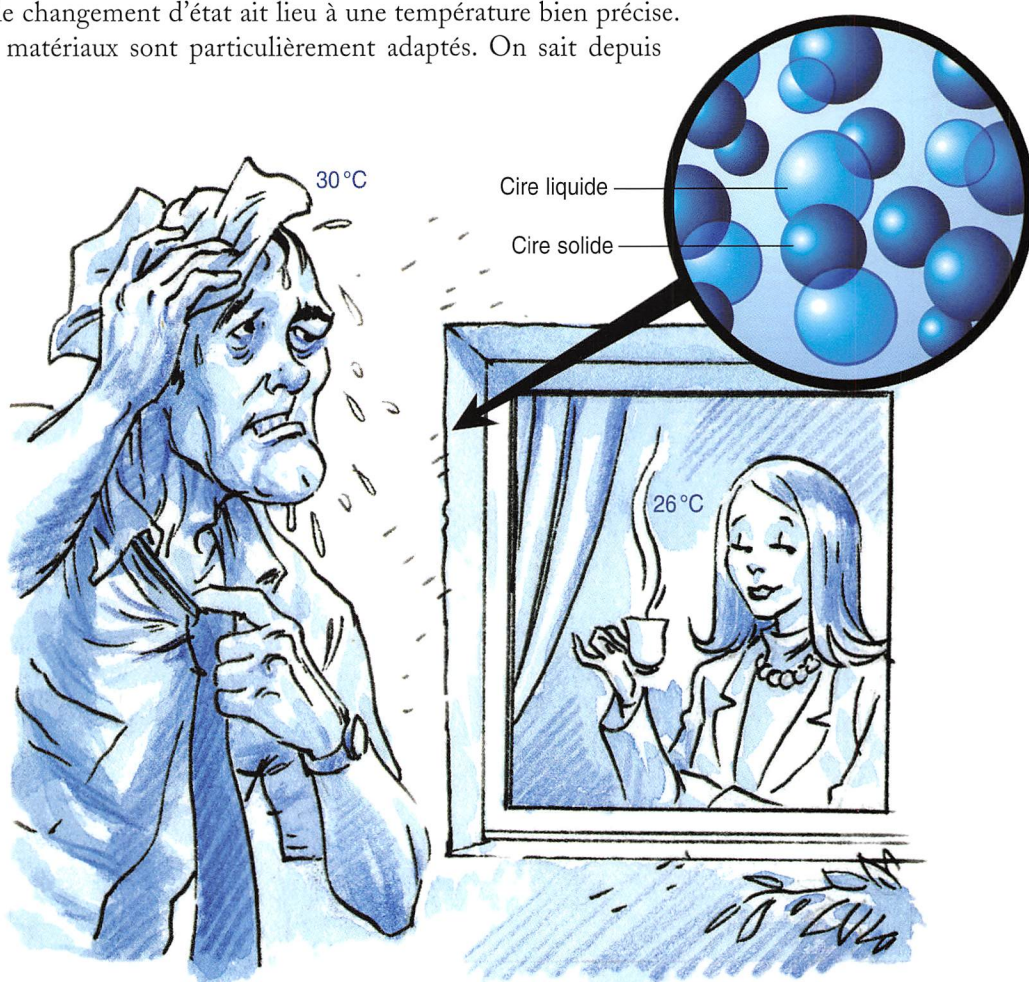
Lors d'un changement de phase, par exemple la fusion d'un solide en liquide, la température reste constante, mais des quantités considérables d'énergie sont mises en jeu. Ainsi, la chaleur latente de fusion de la glace, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour faire fondre (à 0°C) un kilogramme de glace, représente près de 0,1 kilowattheure, soit assez pour porter à ébullition un litre d'eau initialement à température ambiante. La fusion est une transformation réversible: toute la chaleur cédée au matériau pour le faire fondre est restituée lors de la solidification. Il s'agit donc là d'une forme de stockage d'énergie bien adaptée lorsqu'on a affaire à des comportements thermiques cycliques.

La Société *BASF* commercialise ainsi *Micronal*, une cire enrobée dans des microcapsules de polymère que l'on peut incorporer dans des matériaux de construction. Quand sa température atteint 26°C, la cire fond jusqu'à se liquéfier et absorbe de la chaleur à température constante, ce qui évite que la chaleur soit transférée au bâtiment (*voir la*

figure 1). L'été, on peut ainsi avoir trois à quatre degrés de moins par rapport à un bâtiment ordinaire. La nuit, il suffit que la température extérieure passe sous les 26 °C pour que la cire recristallise et soit prête pour une nouvelle journée.

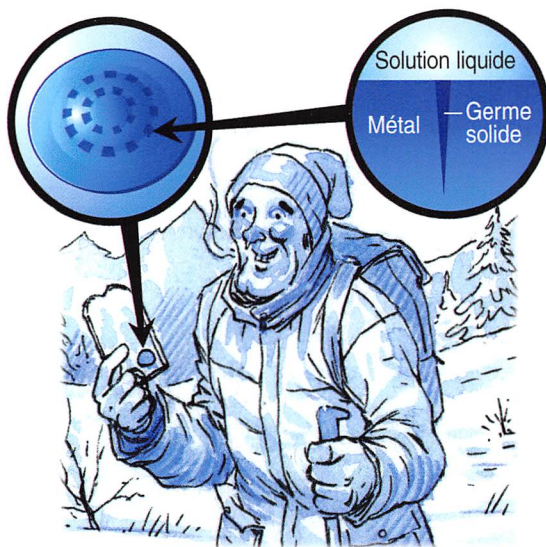
Dans certaines conditions, il arrive que, porté à une température inférieure à celle de solidification, le liquide... reste liquide: ce phénomène de retard à la solidification est aussi nommé surfusion. On en a un exemple avec les pluies verglaçantes. Alors qu'il fait moins de 0 °C, les gouttelettes d'eau demeurent liquides, jusqu'au moment de l'impact sur le sol glacé où elles se transforment instantanément en glace. De tels retards sont en général des nuisances dans les applications, car, le plus souvent, le changement de phase a lieu de façon intempestive. L'eau pure peut ainsi rester liquide jusqu'à -39 °C, mais le moindre contact avec un corps solide la fait geler.

Ce phénomène peut cependant être retourné à notre avantage s'il est contrôlé. On se débarrasse alors de la contrainte physique qui impose qu'à pression donnée, le changement d'état ait lieu à une température bien précise. Certains matériaux sont particulièrement adaptés. On sait depuis



1 Une cire qui se liquéfie à 26 °C est à la base de matériaux de construction procurant du confort thermique. Des microcapsules de cire sont intégrées aux matériaux de la façade. Si la température extérieure dépasse 26 °C, la cire se liquéfie dans une partie au moins des microcap-

sules. La transition de l'état solide à l'état liquide absorbe une quantité notable de chaleur et se fait à température constante. On peut ainsi amortir un réchauffement temporaire et, si l'on compare à une construction usuelle, gagner quelques degrés de fraîcheur.

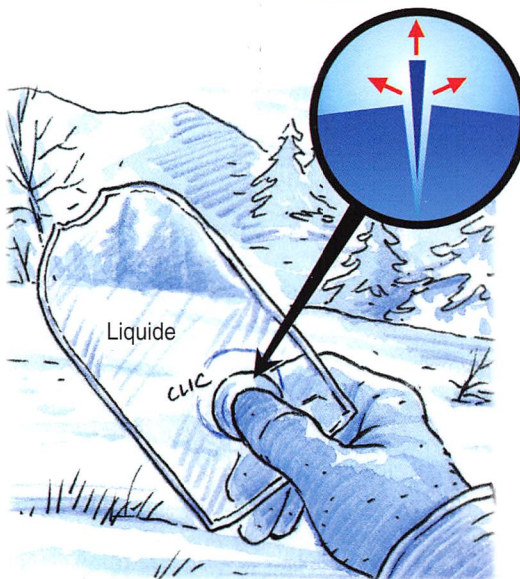


plus d'un siècle qu'une solution d'acétate de sodium (CH_3COONa) reste liquide bien au-dessous de la température de solidification (54°C pour une solution à 20 pour cent) si on la prépare dans un récipient propre et si on la refroidit lentement. C'est cette propriété qu'exploitent les chauffeuses chimiques, avec lesquelles on traite les hypothermies, atténue les douleurs musculaires, réchauffe des boissons, etc.

Une solidification retardée

Une chauffeuse est constituée d'une enveloppe souple de plastique qui contient une solution aqueuse à 20 pour cent d'acétate de sodium. En appuyant sur une pastille métallique placée à l'intérieur, on déclenche la solidification de la solution, ce qui libère de l'ordre de 40 kilojoules (de quoi faire gagner 20 degrés à un demi-litre d'eau). La solidification s'amorce à partir de la pastille et restitue l'énergie qu'il a fallu fournir au matériau pour le faire fondre. Localement, la solution s'échauffe jusqu'à la température normale de solidification (54°C) et, au bout de quelques secondes, il s'est formé une structure solide poreuse contenant encore du liquide. Ce liquide se solidifie ensuite progressivement à mesure que la chauffeuse cède de la chaleur à l'extérieur.

Après utilisation, on peut régénérer la chauffeuse en faisant fondre le solide obtenu, par exemple dans un bain d'eau bouillante. On



2 La chauffeuse contient une solution d'acétate de sodium en surfusion (c'est-à-dire un liquide plus froid que sa température nominale de solidification, qui est de 54°C) et un disque métallique incurvé gravé de petites marques. Les craquelures du disque contiennent de petits morceaux solides d'acétate de sodium, qui constituent des germes de solidification (*en haut*). En appuyant sur le disque, celui-ci se déforme et des germes sont éjectés dans le liquide environnant (*au milieu*). Le liquide se solidifie alors à partir des germes; cette solidification retardée dégage de la chaleur (*en bas*).

laisse alors le matériau doucement refroidir : sans perturbation extérieure, il peut rester liquide jusqu'à une température de -120°C !

Comment s'explique un tel retard à la solidification ? La réponse réside dans les mécanismes de croissance des solides à l'échelle moléculaire. Grâce à leurs collisions, les molécules forment des agrégats qui peuvent croître ou au contraire fondre en taille au cours du temps. Au-dessus de la température de solidification, il ne se forme aucun agrégat ayant la structure du solide. Au-dessous, il s'en forme, mais ceux-ci disparaissent s'ils ne dépassent pas une taille critique, au-delà de laquelle ils continuent à croître indéfiniment. Si la température n'est pas assez basse, aucun germe de solide n'atteint la taille critique et le matériau reste liquide. En revanche, si l'on ajoute un agrégat solide assez gros dans le fluide, ce dernier se solidifie immédiatement.

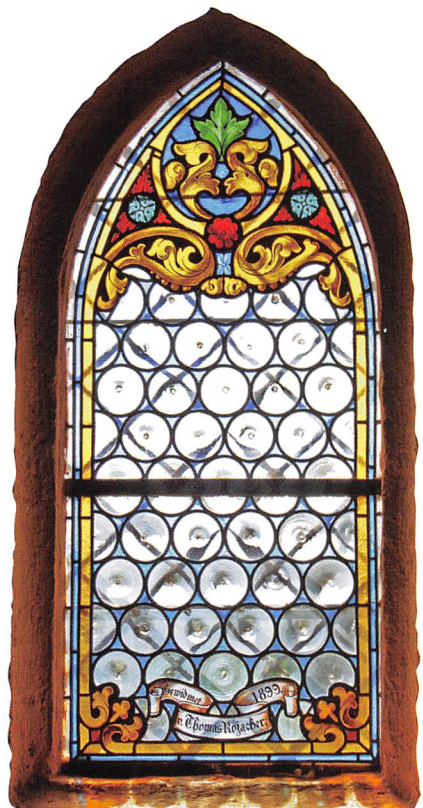
Des germes solides éjectés

Pour provoquer de façon certaine la solidification, il faut donc favoriser la création d'un germe. Pour ce faire, le plus simple est de perturber le milieu en y créant une surpression. Avec de l'eau surfondue, il suffit de frotter un agitateur : les ondes sonores du grincement suffisent à déclencher la solidification. Avec l'acétate de sodium cependant, rien n'y fait (il faudrait une surpression de l'ordre de 5 000 atmosphères à 20°C) ; tant mieux, car cela permet de stocker des chauffeuses sans craindre que leur liquide cristallise au moindre choc ou bruit.

Comment alors déclencher la solidification de l'acétate de sodium ? La solution réside dans le petit disque métallique incurvé placé dans la chauffeuse. Ce n'est pas le clic brutal, créé en appuyant dessus, qui provoque la solidification.

L'explication est ailleurs. Le disque, de deux centimètres de diamètre, est flexible et gravé de nombreuses indentations. Dans les craquelures microscopiques de sa surface, des germes solides d'acétate de sodium peuvent se loger. Comme l'ouverture de ces craquelures est très petite, le contact des germes avec le liquide est limité et n'induit pas sa solidification. Parfois, la taille du germe entier dépasse la valeur critique. Or une déformation du disque a pour effet d'éjecter dans la solution de nombreux germes, dont certains sont alors assez grands pour amorcer la solidification (*voir la figure 2*).

Par ailleurs, au fond d'une craquelure, les conditions sont telles que le germe solide reste stable, même à température élevée. Par conséquent, lors de la régénération de la chauffeuse, il reste toujours de l'acétate de sodium solide au fond des interstices. Si on élimine tout germe solide, par exemple en lavant avec soin le disque, celui-ci est désactivé : sa flexion ne provoque plus de solidification. Si, ensuite, on solidifie la chauffeuse par un autre moyen, le disque est réactivé, car de nouveaux germes apparaissent au sein des interstices. Les chauffeuses chimiques sont ainsi des dispositifs robustes : d'une part, leur liquide est insensible aux perturbations mécaniques et ne se solidifie que lorsqu'on y ajoute des germes ; d'autre part, cet ajout est facile à contrôler.



Shutterstock / Dan Breckwoldt

Quand le verre s'écoule

Le verre est-il vraiment un solide ? Non, mais sa viscosité est si élevée qu'aucun écoulement n'est perceptible, pas même à l'échelle de plusieurs siècles.

Certains matériaux ne passent pas instantanément de l'état liquide à l'état solide lorsqu'ils se refroidissent naturellement. Ainsi, le goudron ou le verre deviennent pâteux et s'écoulent de plus en plus lentement à mesure que leur température diminue. Quel est l'état de ces corps à température ambiante ? Une expérience qui a débuté en 1927 montre que le goudron s'écoule très lentement. Selon une idée répandue, il en serait de même pour les verres à l'échelle des siècles, et les vitraux des cathédrales en attesteraient. Mais est-ce vraiment le cas ?

Dans le principe, la distinction entre un fluide et un solide est claire : est solide un corps qui conserve sa forme, est fluide un corps qui s'écoule et épouse la forme du récipient. La plupart du temps, nous n'avons aucun mal à faire la différence. Mais qu'en est-il, par exemple, de la gelée au madère ou du camembert bien fait ? De prime abord, nous aurions tendance à classer ces deux substances dans la catégorie floue des substances molles, c'est-à-dire qui se déforment uniquement sous l'effet d'une contrainte. Cependant, après une nuit à température ambiante, le cube de gelée est toujours cubique tandis que la portion de camembert est devenue informe. Il apparaît donc que la gelée est solide et pas la pâte du camembert, du moins à l'échelle d'une nuit.

Nous n'avons pas spontanément reconnu le camembert comme fluide, parce que le temps qu'il met à s'écouler est bien plus long que celui pris par l'eau ou le miel. Cette durée est en effet proportionnelle à la viscosité du fluide, grandeur qui mesure sa résistance à l'écoulement, et inversement proportionnelle à sa masse volumique.

Or si la viscosité de l'eau est d'une centipoise, celle du miel atteint 5 000 centipoises et celle du camembert 50 millions. Peu familiers avec ces unités, nous pouvons



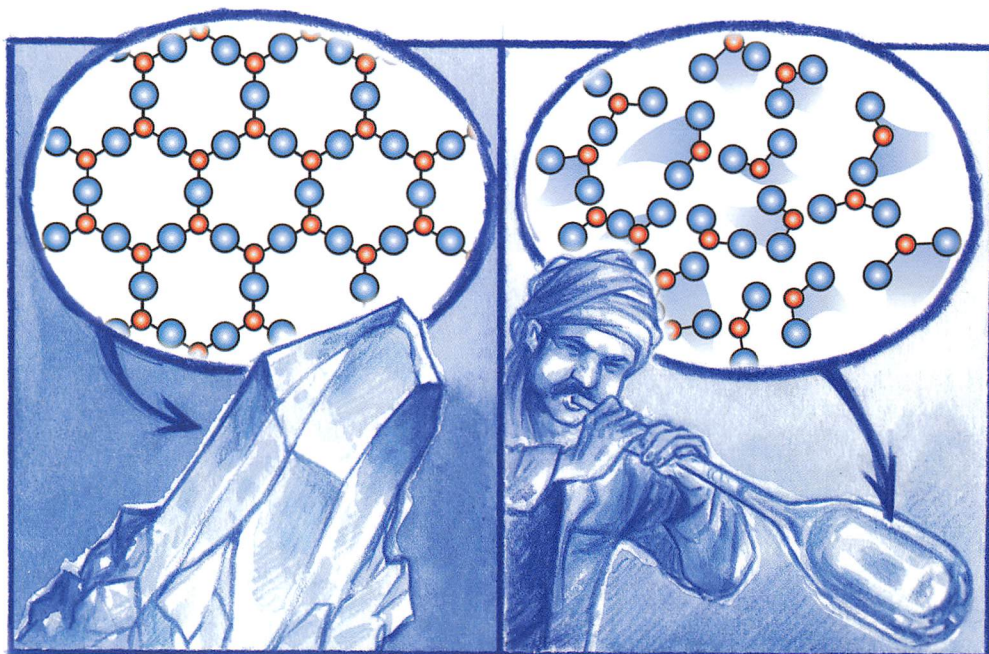
1 Le miel est assez fluide pour s'écouler et n'importe qui peut s'en rendre compte. Le goudron aussi s'écoule à la température ambiante, mais cet écoulement est presque

imperceptible. Ainsi, dans une expérience commencée en 1927, huit gouttes seulement de goudron ont franchi le col d'un entonnoir et sont tombées dans le récipient inférieur.

néanmoins comparer ces chiffres relatifs à deux substances dont les densités sont proches : s'il faut 10 secondes au miel pour couler, il en faudra 100 000 pour le camembert, soit plus d'une journée.

Une goutte de goudron en huit ans

Ces exemples montrent que la fluidité doit être associée à une échelle de temps. Un cas étonnant est celui du goudron ; il semble solide et cassant pour des essais brefs, mais il coule à la longue. En 1927, Thomas Parnell, de l'Université du Queensland, en Australie, démarra ce qui est devenu l'expérience de physique la plus longue de l'histoire. Il versa du goudron fondu dans un entonnoir dont l'orifice était clos. Après avoir attendu trois ans que le goudron soit complètement refroidi, il déboucha l'orifice. Depuis, l'expérience se poursuit et le goudron s'écoule lentement. La première goutte est tombée au bout de huit ans en 1938. On en est aujourd'hui à huit gouttes, et il y a semble-t-il assez de goudron pour que l'expérience dure encore une centaine d'années... En supposant que le goudron s'écoule dans l'entonnoir comme le ferait de l'eau, on a estimé sa viscosité à 20 milliards de centipoises.



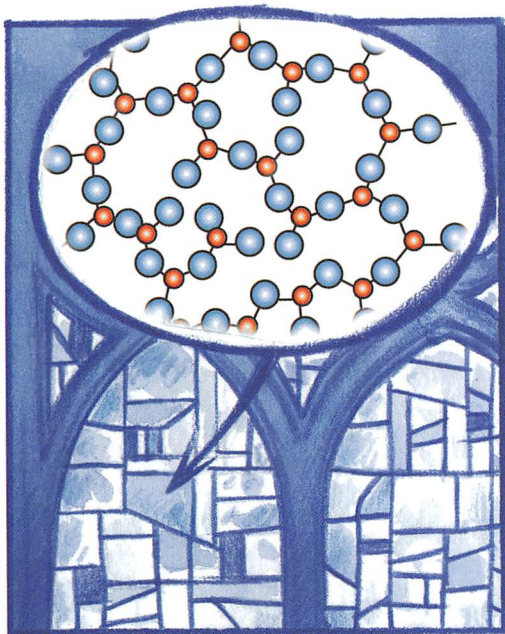
Ces ordres de grandeurs font apparaître une difficulté quant à la définition de la fluidité. Qu'advient-il lorsque l'échelle de temps de l'écoulement dépasse l'histoire de l'humanité, voire les temps géologiques ? Une telle situation se rencontre dans le cas des verres.

Suivons ce qui se passe lorsqu'un matériau se refroidit. À suffisamment haute température, il est liquide : ses molécules sont animées de mouvements incessants, avec des énergies cinétiques assez élevées pour empêcher l'apparition d'une structure ordonnée. À mesure que la température s'abaisse, les molécules ralentissent et leurs interactions diminuent leurs mouvements relatifs. À notre échelle, on constate un accroissement sensible de la viscosité ; dans le cas de l'eau, elle est multipliée par six entre 100°C et 0°C .

Dans les corps cristallins, il existe une température bien précise, la température de solidification (ou de fusion), pour laquelle les molécules s'immobilisent en s'ordonnant sur un réseau périodique et ne conservent que de petits mouvements vibratoires autour de leurs positions d'équilibre. Le matériau est alors devenu solide et la notion de viscosité perd son sens.

Les vitraux des cathédrales, une fausse preuve

Tel n'est pas le cas de la plupart des verres, dont la viscosité augmente de façon phénoménale sur un intervalle de quelques centaines de degrés. Prenons l'exemple d'un verre du commerce utilisé pour des fenêtres : vers 1000°C , sa viscosité est de un million de centipoises, assez faible pour qu'il soit soufflé et travaillé. Vers 700°C , elle a été multipliée par 4000 ; malgré cette valeur élevée, on peut observer des déformations du verre sous l'effet de son propre poids. À 550°C , la viscosité atteint un million de milliards de centipoises, soit 50 000 fois plus que le goudron. Cette valeur de la viscosité définit par convention la température de transition vitreuse.



2 Dans de la **silice cristalline**, les molécules $[\text{SiO}_2]$ sont disposées de façon ordonnée (*page ci-contre, à gauche*). Liquide, ce matériau constitue du verre fondu : les molécules sont libres de se déplacer les unes par rapport aux autres, et ont donc des positions irrégulières (*page ci-contre, au centre*). En refroidissant, le verre fondu se solidifie : des liens intermoléculaires se créent et la structure désordonnée se fige (*ci-contre*).

À cette température, la disposition des molécules ressemble à celle d'un liquide – elle est désordonnée –, mais les molécules sont quasi immobiles. La structure du verre apparaît alors comme celle d'un liquide figé, du moins à l'échelle de quelques milliers d'années. Pour des températures plus basses encore – la température ambiante, par exemple –, le verre, dans un état de la matière dit amorphe, est considéré comme solide.

La physique de la transition vitreuse est loin d'être éclaircie, mais nos connaissances sont suffisantes pour mettre fin à un mythe scientifique. Dans certains ouvrages de vulgarisation, on peut lire qu'à température ambiante, le verre est encore pâteux et s'écoule très lentement. Les vitraux datant du Moyen Âge en seraient la preuve : ils sont plus épais à leur base qu'à leur sommet, ce qui résulterait d'un écoulement sous l'effet de la gravité au cours des siècles. Hélas, sans même invoquer la verrerie romaine – par exemple le vase *Portland* du *British Museum*, toujours aussi délicat après 2000 ans d'existence – ni le fait que la hauteur du vitrail n'a pas varié, une étude approfondie montre qu'il n'en est rien.

On peut évaluer la température à laquelle on devrait porter le vitrail pour percevoir, sur une période de 1000 ans, un écoulement : le résultat est de l'ordre de 400 °C. On peut aussi obtenir une valeur effective de viscosité en extrapolant à la température ambiante la dépendance en température de la viscosité (à température ambiante, la viscosité des verres, si tant est qu'elle ait un sens, ne peut être mesurée directement). On trouve alors des valeurs de l'ordre de 10^{22} centipoises, ce qui correspond à des temps caractéristiques d'écoulement de dix milliards d'années – l'âge de l'Univers...

En fait, il semble que les procédés de fabrication anciens ne permettaient pas d'obtenir un verre aussi uniformément plat qu'aujourd'hui, et qu'afin d'assurer une meilleure solidité, les artisans auraient volontairement placé les vitraux de façon que leur partie la plus épaisse se trouve en bas et leur partie la plus mince en haut. Que ne l'ont-ils écrit noir sur blanc !



Coup de froid sur le chaud

Aristote l'avait observé : sous certaines conditions, l'eau chaude gèle plus vite que l'eau froide. Plus de 2 300 ans après, le phénomène reste à éclaircir.

De l'eau bouillante lancée dans de l'air très froid, dans le Minnoseta, se transforme en cristal de glace.

L'eau chaude peut geler plus vite que l'eau froide : loin d'être un canular, ce phénomène paradoxal est connu depuis l'Antiquité et dans les traditions locales des peuples du Nord. Redécouvert dans les années 1970 par des physiciens amateurs, l'«effet Mpemba» – c'est son nom – a suscité une littérature abondante. Précisons ce dont il s'agit. Lorsqu'on met au congélateur deux récipients identiques contenant chacun le même volume d'eau, mais à des températures différentes, on constate que, sous certaines conditions, l'eau la plus chaude gèle avant l'eau froide.

Ce n'est pas un canular

Cet étonnant effet est devenu d'actualité en 1963 à la suite des observations d'un lycéen tanzanien, Erasto Mpemba : sa crème glacée avait pris en masse plus vite que celles de ses camarades, alors qu'il était le seul à avoir mis son lait encore chaud au congélateur. Après avoir fait part de sa découverte à de nombreux enseignants de lycée incrédules, il trouva un écho favorable chez Denis Osborne, professeur d'université à Dar es-Salaam, qui reproduisit avec succès l'expérience et publia ses résultats.

L'affaire Mpemba était lancée. En faveur des conclusions de D. Osborne et E. Mpemba, on convoqua les plus grands. Aristote, dans son premier livre des *Météorologiques*, ne nous apprend-il pas que les habitants du Pont, pour bien fixer les piquets de leurs palissades, les aspergeaient d'eau chaude parce qu'elle gèle plus rapidement ? De même, au XIII^e siècle, Roger Bacon, dans son *Opus majus*, rapporte que l'eau chaude jetée sur de la glace y gèle plus rapidement que l'eau froide. Cela confirme la sagesse populaire : au

Canada, on asperge d'eau chaude la glace d'une patinoire pour l'épaissir et l'on sait que les tuyaux d'eau chaude sont plus sujets à l'éclatement sous l'effet du gel que les canalisations d'eau froide.

Toutes ces observations sont cependant vagues et correspondent à des conditions expérimentales diverses et imprécises. Conscient de cette difficulté, le physicien américain Jearl Walker mena ses propres expériences en 1977. Après quelques tentatives infructueuses, il trouva que pour certaines formes de récipient et certaines quantités d'eau, l'effet Mpemba se produit bel et bien. Pour un récipient et un volume d'eau bien choisis, à mesure que l'on accroît la température initiale de l'ensemble récipient-eau, la durée pour que l'eau atteigne 0°C dans un réfrigérateur augmente d'abord avec la température initiale, passe par un maximum puis diminue. Ainsi, 50 millilitres d'eau dans un bécquet de 8,2 centimètres de diamètre atteignent 0°C en 25 minutes pour une température initiale de 25°C , en 32 minutes pour 63°C et en 27 minutes pour 80°C : dans ce cas, l'eau à 80°C refroidit plus vite que l'eau à, mettons, 45°C .

Parce que l'eau s'évapore ?

Une approche rigoureuse et la réputation de sérieux de J. Walker ont clos un premier sujet de débat : il n'y a aucun doute sur l'existence de l'effet Mpemba. De plus, son travail a ouvert une piste pour l'expliquer, à savoir l'évaporation de l'eau. Une fraction notable d'eau initialement chaude peut en effet se vaporiser pendant le refroidissement. J. Walker donne un pourcentage de sept pour cent à 70°C et de plus de dix pour cent à 95°C . Du coup, la masse d'eau à refroidir réellement, donc l'énergie à prélever, est d'autant plus petite que la température initiale est élevée ! Cela explique sans doute l'observation de Bacon et celle des Canadiens au sujet des patinoires.

Puisque l'évaporation ne se produit que par la surface de l'eau en contact avec l'air, on comprend que la forme du récipient puisse avoir une influence déterminante sur l'existence de l'effet Mpemba. Celui-ci se réduit-il alors à une curiosité de foire où



1 Au Canada, on verse de l'eau chaude plutôt que de l'eau froide sur la glace des patinoires pour les remettre en état. L'eau chaude gèlerait en effet plus vite, en vertu de l'effet Mpemba. L'évaporation, plus importante pour l'eau chaude, serait l'une des raisons de ce phénomène. Mais l'effet Mpemba a été observé même sans évaporation.

domine l'astuce? Non, car le phénomène subsiste en utilisant un récipient clos. Autrement dit, la perte de masse due à l'évaporation ne suffit pas à expliquer l'effet.

Faut-il renoncer à notre intuition physique d'après laquelle abaisser à 0°C de l'eau chaude requiert plus d'énergie à prélever que pour de l'eau froide, donc, dans des conditions identiques de refroidissement, plus de temps? Lorsque l'eau chaude refroidit, elle devrait passer par une étape où sa température est égale à celle de l'eau froide, et devrait donc mettre plus de temps que cette dernière pour geler. Où est la faille du raisonnement?

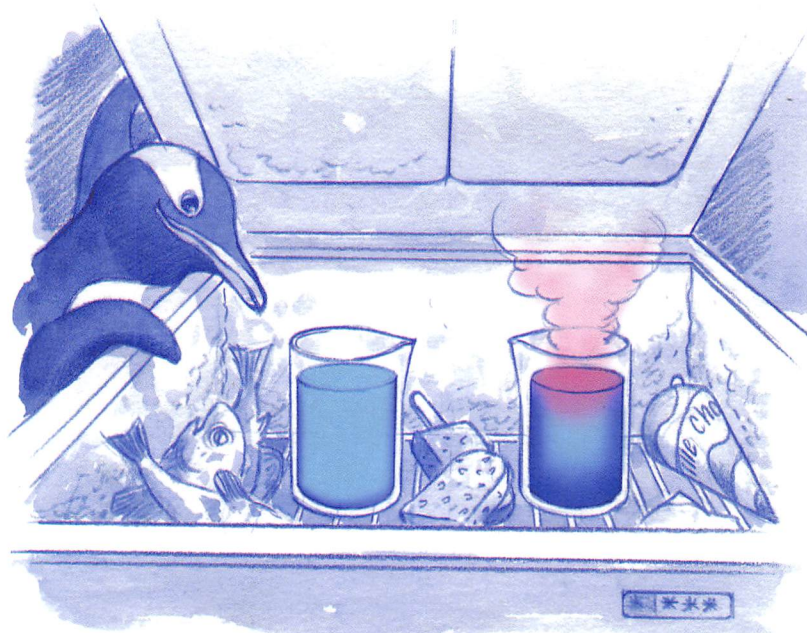
En réalité, une fois le récipient plongé dans l'atmosphère glaciale, la température de l'eau n'est pas du tout homogène. Pourquoi? Parce que la densité de l'eau dépend de la température et est maximale à 4°C . L'eau sur les bords, qui se refroidit en premier, tombe alors au fond du récipient et est remplacée par de l'eau plus chaude, ce qui amorce des mouvements convectifs de grande ampleur. Ces mouvements favorisent sans doute le transfert thermique et sont sûrement plus importants lorsque la température initiale de l'eau est élevée.

En raison de ces hétérogénéités, l'eau chaude et l'eau froide ne suivent pas le même chemin en température, et l'on ignore *a priori* lequel sera plus rapide que l'autre à parcourir.

Appelons à la rescousse René Descartes, qui s'est aussi illustré sur cette question. Dans *Les Météores*, il rapporte que l'eau bouillie, qu'on a laissée refroidir à la température ambiante, gèle plus vite que de l'eau non bouillie conservée à la température ambiante. En 1916, un physicien américain, F. C. Brown, confirma cette observation: des tubes de verre remplis d'eau bouillie et refroidis à moins de 0°C se cassent bien plus facilement que les mêmes tubes remplis d'eau non préalablement chauffée.

2 L'eau chaude du récipient

de droite se refroidit moins uniformément que l'eau froide [récipient de gauche], et devient le siège de mouvements de convection de grande ampleur (eau froide en bleu foncé, eau chaude en rose), l'eau froide descendant et l'eau chaude montant. Ajoutée à l'évaporation, cette convection joue sur la vitesse de la prise en glace.





3 **Soumises à un froid intense**, les canalisations d'eau chaude ont tendance à éclater plus facilement que les tuyaux d'eau froide. À l'intérieur de ces derniers, une gangue de glace

se forme sur les parois, mais laisse l'eau s'écouler. Dans le tuyau d'eau chaude, l'eau gèle de façon désordonnée, en formant des dendrites qui obstruent rapidement le conduit.

On cherche de nouvelles pistes

On attribue aujourd'hui ce comportement à la teneur en gaz différente dans les deux types d'eau. En chauffant, on élimine en grande partie les gaz dissous dans l'eau (le dioxygène et le dioxyde de carbone principalement). Or il semble que leur présence joue un rôle important, quoique fort mal connu, dans le gel de l'eau. J. Walker avait utilisé de l'eau fraîchement bouillie. Deux ans après lui, l'Anglais M. Freeman prétendit que seule de l'eau saturée en gaz carbonique peut produire l'effet Mpemba. En 1988, le Polonais B. Wojciechowski et ses collègues affirmèrent – au contraire de J. Walker – que l'eau ne doit pas être dégazée...

Certains invoquent par ailleurs un effet de surfusion, pour lequel l'eau reste liquide alors que la température est inférieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; mais de nombreuses expériences consistent justement à repérer quand l'eau atteint $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et non quand la glace se forme. Le lecteur l'aura compris : l'effet Mpemba se joue des physiciens et les fait tourner en bourrique. Près de 30 ans après le travail de J. Walker, aucune explication solide n'a vu le jour. Peut-être parce que l'expérience est trop sensible aux conditions de sa réalisation pour être aisément reproductible ?

Ni trop chaud ni trop froid



Shutterstock / Carsten Medom Madsen

Notre corps est assez bien armé pour se protéger de la chaleur, mais beaucoup moins pour résister au froid. Surtout au contact de l'eau !

C'est l'été, et nous pensons surtout à nous protéger de la chaleur. Il faut aussi parfois se protéger du froid, en particulier quand on est au contact de l'eau. Même dans une eau tempérée, un plongeur doit se prémunir de l'hypothermie, baisse de la température corporelle qui peut provoquer coma et arrêt cardiaque. Comment le corps maintient-il sa température fixée à 37°C ? Pourquoi l'eau nous refroidit-elle tant ? Et comment s'en prémunir ?

Évacuer la chaleur produite pour rester à 37°C

Pour que notre température interne reste fixe, le corps doit évacuer la chaleur produite par le métabolisme : environ 100 watts au repos, davantage lorsque nous sommes actifs. Comment ? En jouant sur la température cutanée. Les échanges de chaleur entre le corps et l'extérieur sont en effet proportionnels à la différence de température entre l'air ambiant et la peau. Aussi, lorsque nous sommes en tenue d'Adam, pour évacuer les 100 watts du métabolisme de base, la peau doit avoir une température dépassant de un à deux degrés celle de l'air.

Cet écart de température est maintenu grâce à une modification de la circulation sanguine à proximité de la peau. Lorsque la température ambiante augmente, les vaisseaux

cutanés se dilatent, d'où un apport de sang à 37 °C et une peau plus chaude. Et quand la température ambiante diminue, la contraction des vaisseaux abaisse la température cutanée. Cette régulation physiologique ne fonctionne toutefois que sur une plage réduite de températures, entre 20 et 30 °C environ.

La température de la peau est plafonnée vers 35 °C. S'il fait plus chaud, c'est le corps qui reçoit de la chaleur de son environnement. Et même si la température extérieure n'est pas élevée, en cas d'activité physique, la chaleur produite par le corps est quatre fois supérieure à la puissance mécanique qu'il fournit. Un sportif en plein effort soutenu (500 watts de puissance mécanique) libère ainsi deux kilowatts de chaleur, 20 fois la valeur du métabolisme au repos. Or il faut de l'ordre de 300 kilojoules pour refroidir ou réchauffer de un degré le corps, dont l'inertie thermique est importante (car il est en bonne partie formé d'eau). En produisant deux kilowatts de chaleur, le corps gagnerait ainsi un degré toutes les trois minutes !

Comment évacue-t-il cette chaleur ? En transpirant abondamment. Puisqu'il faut 2,3 kilojoules pour évaporer un gramme d'eau, le corps peut dissiper deux kilowatts en consommant trois litres d'eau par heure. C'est beaucoup, mais cela signifie que, convenablement hydraté et ventilé, l'homme peut supporter de fortes chaleurs.

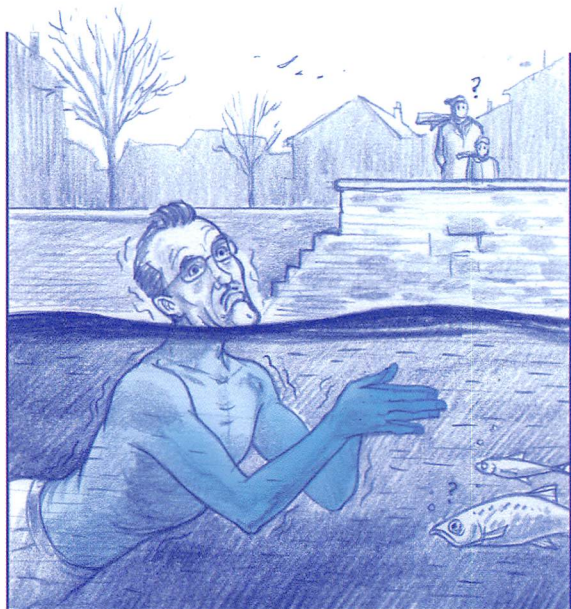
Sa résistance au froid est moins glorieuse : au-dessous de 20 °C, le corps ne peut plus abaisser la température cutanée et les pertes thermiques s'intensifient. Dans une atmosphère à 10 °C, Adam a besoin de 500 watts pour maintenir sa température. Il est condamné à marcher sans cesse ou à frissonner. Les frissons, des contractions non synchronisées des muscles, constituent une activité physique spontanée, mais ils sont pénibles et vite épuisants. Et une fois le corps refroidi, le métabolisme seul ne permet pas de faire remonter la température : avec un métabolisme de 400 watts (qui correspond à un effort soutenu et fatigant), il faut environ un quart d'heure pour gagner un degré.

Pour se protéger du froid, il est donc indispensable de limiter les échanges thermiques. Tel est le rôle des poils ou des plumes pour les animaux, et des vêtements pour nous autres humains. Ces protections immobilisent de l'air, un excellent isolant, près de la peau.

L'eau est 25 fois moins isolante que l'air

L'eau est un milieu plus problématique, car elle conduit très bien la chaleur, 25 fois plus que l'air. Dans ces conditions, même dans de l'eau calme, les pertes thermiques sont bien plus importantes qu'au contact de l'air. Elles atteignent près de 200 watts (métabolisme d'un corps ayant une faible activité) dans une eau à 25 °C ! D'où, si le séjour dans l'eau se prolonge, un risque d'hypothermie et de crampes musculaires. Les membres ont tendance à se refroidir plus vite (par rapport au torse, ils présentent beaucoup de surface pour un faible volume, et leur inertie thermique est moindre) et sont vite atteints d'intenses frissons. Ils sont les premiers à se fatiguer, à se tétaniser... ce qui peut provoquer une noyade alors que le corps n'est pas encore en hypothermie généralisée.

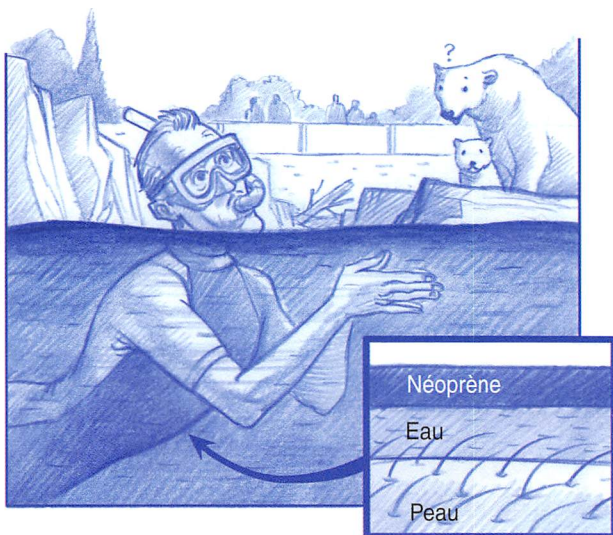
Aussi, en cas de séjour prolongé dans l'eau, il convient de se protéger avec des combinaisons adaptées. Il s'agit encore une fois d'éviter la convection (déplacement de matière qui emporte de la chaleur) et de créer une couche d'isolant thermique. Les animaux résolvent ce problème de deux façons. Les phoques et les ours, par exemple, sont totalement mouillés en immersion. Cependant, grâce à leur fourrure, une couche d'eau



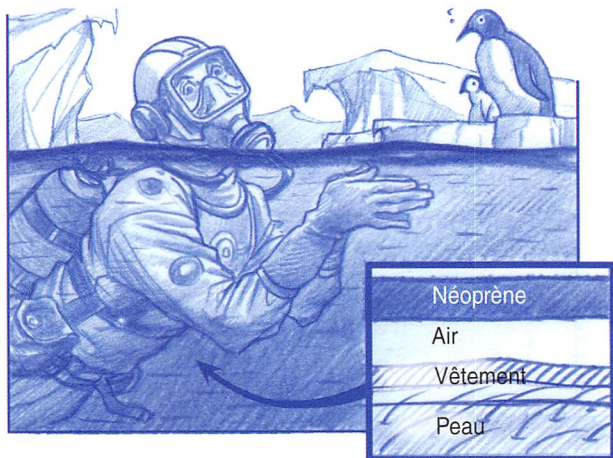
presque immobile de quelques millimètres à un centimètre d'épaisseur se maintient autour de leur corps. La convection est donc éliminée, mais comme l'eau conduit bien la chaleur, l'isolation thermique est plutôt assurée par une couche de graisse sous la peau. Pour les oiseaux, en revanche, le plumage non mouillant empêche l'eau de venir au contact de l'épiderme et piège une fine couche d'air. L'isolation requiert alors moins de graisse.

Empêcher la convection et fournir une isolation

On retrouve ces mécanismes dans deux types de combinaisons de plongée. Dans la combinaison dite humide, une mince pellicule d'eau remplit l'interstice entre la peau et la combinaison. Si cette dernière est bien ajustée au corps, cette eau circule peu, et on évite les pertes par convection. Le matériau utilisé



L'eau conduit bien la chaleur, et c'est pourquoi on se refroidit vite en nageant sans protection thermique dans une eau même tempérée (*en haut*). Les membres se refroidissent plus vite que le torse, en raison d'un rapport surface/volume plus important et d'une moindre inertie thermique. Pour des séjours prolongés dans l'eau ou dans des eaux plus froides, le port d'une combinaison est nécessaire. Dans la combinaison humide (*au centre*), la peau est en contact avec un film d'eau qui transmet la chaleur par conduction, mais pas par convection. La couche de néoprène qui l'enveloppe est un isolant thermique. Le système de protection thermique de l'ours est analogue, la fourrure immobilisant de l'eau et une couche de graisse assurant l'isolation. Dans la combinaison sèche (*en bas*), le plongeur est au sec et peut porter des vêtements. Cette fois, c'est de l'air (un très bon isolant) ou un autre gaz qui remplit l'espace laissé libre par la combinaison. Chez les oiseaux tels que les pingouins, de l'air est aussi enfermé grâce au plumage, qui assure ainsi une bonne protection thermique.



est du néoprène assez épais (deux à huit millimètres), au sein duquel une multitude de très petites bulles d'air assurent l'isolation thermique. La combinaison dite sèche, quant à elle, est totalement étanche et maintient le corps au sec. En injectant du gaz de la bouteille dans la combinaison, on crée la couche isolante.

En plongée profonde, ces deux combinaisons trouvent leur limite. La combinaison sèche ne convient plus parce que le gaz injecté à partir de la bouteille, de l'hélium dans ce cas-là, se comprime fortement et devient plus conducteur alors même qu'il n'a pas le pouvoir isolant de l'air. Il faut donc une bouteille auxiliaire contenant un gaz plus lourd, tel le krypton. Quant à la combinaison humide, le néoprène s'écrase sous l'effet de la pression et, à partir d'une certaine profondeur, sa protection thermique devient nulle. Ce problème crucial est actuellement résolu en introduisant de l'eau chaude entre le vêtement externe et un sous-vêtement de caoutchouc plaqué sur le corps. De plus, dans ces situations extrêmes, on ne peut plus négliger les pertes thermiques liées à la respiration (on inspire de l'air froid et on expire de l'air chaud, le tout à haute pression) et il faut aussi chauffer les gaz inspirés.

La plongée de loisir ne nécessite pas de tels équipements. Mais on peut améliorer son confort thermique en utilisant une chaufferette à acétate de sodium. Un simple clic mécanique déclenche la cristallisation de la solution, qui dégage alors une douce chaleur. Placé dans une ceinture portée sous la combinaison humide, le dispositif va chauffer l'eau intérieure et permettre au plongeur de mieux profiter de sa plongée.



Trois petites notes de musique



Flûte, saxophone, mais aussi trompette,
clarinette, didgeridoo et... cornet de glace :
une affaire de sons.

Shutterstock / Andy z

Saxophone et flûte, deux formes pour deux types de sons.



Quand le son devient glaçant

Transformer l'énergie du son en énergie thermique : une voie prometteuse pour des réfrigérateurs silencieux et performants.

Mille gigawatts : c'est la puissance produite à chaque instant par les machines thermiques (moteurs, réfrigérateurs, etc.) à travers le monde. À l'ère de l'écologie planétaire, l'amélioration des performances de ces machines devient un enjeu crucial. Depuis quelques années, on voit poindre des réfrigérateurs d'un genre nouveau, qui devraient aider à réduire la facture énergétique. Le transfert de chaleur y est assuré par une onde sonore intense, qui réalise des cycles de compression-dilatation sans pistons (ou autre mécanique compliquée sujette à l'usure) ni gaz polluants !

Comment un son peut-il produire un tel effet thermique ? Deux phénomènes se combinent. D'une part, toute onde sonore provoque à son passage de rapides variations de la pression de l'air. D'autre part, quand on comprime rapidement de l'air, il s'échauffe, et lorsqu'on le détend, il se refroidit. Il résulte de ces deux effets qu'une onde sonore crée des variations de température très rapides.

Ces variations sont rapides, mais infimes pour le son d'une conversation normale. À 60 décibels (le niveau sonore d'une conversation), un son grave de 100 hertz provoque des déplacements d'air dont l'amplitude avoisine 0,1 micromètre. Ces vibrations de l'air induisent des variations de pression de 20 millipascals et des variations de température de $1/20\,000^{\circ}$ de degré.

Et avec un son de 160 décibels ? Il n'est bien sûr pas question d'écouter un tel son, bien au-delà du seuil de la douleur. En revanche, à l'intérieur d'un tube clos, il est relativement facile et sans danger de créer des sons de cette intensité. Il suffit que la pression statique du gaz à l'intérieur soit assez élevée (de l'ordre de la dizaine d'atmosphères) et que, pour créer un effet de résonance, la longueur du tuyau soit adaptée à la fréquence du son. Pour un tuyau fermé à une extrémité et alimenté à l'autre par un haut-parleur,

cela correspond à une longueur égale au quart de la longueur d'onde du son émis par le haut-parleur. L'amplitude des vibrations de l'air est alors de l'ordre du centimètre, tandis que les variations de pression sont de l'ordre du centième d'atmosphère, et celles de température de l'ordre du degré.

Comment tirer parti de ces variations de température, peu importantes et très rapides ? En mettant l'air en contact avec une plaque solide capable d'échanger avec lui de la chaleur et en exploitant les va-et-vient de l'air le long de la plaque induits par une onde sonore. Considérons une situation initiale pour laquelle la température est uniforme dans le gaz et dans la plaque avec laquelle il est en contact. Suivons alors l'évolution d'un petit volume de gaz adjacent à la paroi (*voir la figure 2*).

Des cycles de compression sans pistons

Dans la première partie du cycle de l'onde sonore, ce volume se déplace, disons vers la gauche, en se comprimant, donc en s'échauffant. Et comme ce volume de gaz est en contact avec le solide resté à sa température initiale, il chauffe le matériau à l'endroit où il se trouve et se refroidit.

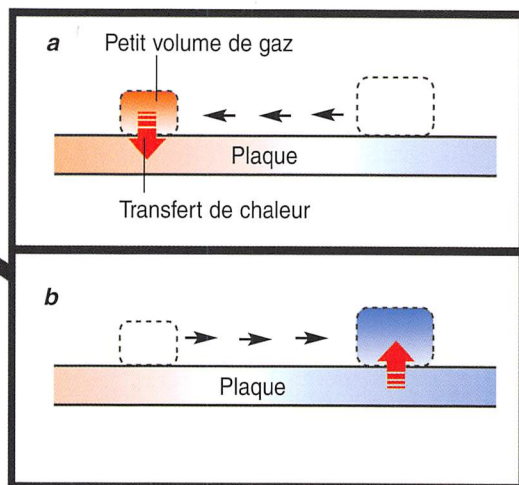
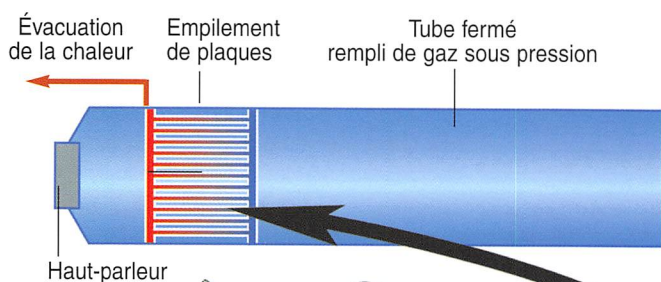


1 La réfrigération thermoacoustique est une technique silencieuse, qui ne fait appel ni à des pièces mécaniques mobiles ni à des gaz polluants. Bien qu'elle ne soit pas encore sur le marché, plusieurs industriels, notamment des fabricants de glaces, envisagent de l'utiliser.

Dans la seconde partie du cycle de l'onde sonore, le volume de gaz se déplace vers la droite en se dilatant; sa température diminue alors encore et, partant, il refroidit le matériau là où il se trouve. La combinaison des va-et-vient et des changements de température crée ainsi, localement, une petite différence de température dans le matériau. Comme ce transfert thermique s'effectue de proche en proche, l'effet s'accumule le long de la plaque: si elle est assez longue, on obtient une différence notable de température entre ses deux extrémités.

L'idée est remarquable, mais, en pratique, comment réaliser un réfrigérateur? Il faut multiplier les zones d'échange entre le gaz et les parois solides, et adapter la géométrie au phénomène. Comme le transfert thermique doit se produire 100 fois par seconde (la fréquence de l'onde), seule une épaisseur d'air de un dixième de millimètre a le temps d'échanger de la chaleur avec la plaque solide. En conséquence, on choisit souvent soit un empilement de plaques distantes d'une fraction de millimètre, soit un bloc de matériau poreux.

En outre, pour que la conversion de l'énergie acoustique en chaleur soit efficace, il faut avoir simultanément un déplacement d'air et des variations de température. Or, dans l'onde stationnaire qui se forme dans un tuyau fermé, la zone où l'amplitude des va-et-vient est maximale est aussi celle où les variations de température sont nulles, et inversement. Il convient donc de placer l'échangeur de chaleur dans une zone intermédiaire.



2 Dans un réfrigérateur thermoacoustique, une intense onde sonore créée par un haut-parleur dans un tube fermé engendre des oscillations du gaz le long de plaques solides. Chaque petit volume de gaz effectue ainsi des va-et-vient d'une amplitude de l'ordre du centimètre tout en se dilatant et en se comprimant alternativement. En se comprimant *[a]*, un volume de gaz en contact avec une plaque s'échauffe à une température supérieure à celle de la plaque et cède

donc une partie de sa chaleur à la plaque, qui s'échauffe localement. En se dilatant *[b]*, le volume de gaz se refroidit à une température inférieure à celle de la plaque à cet endroit et reçoit donc de la chaleur de la plaque, qui se refroidit localement. Un petit gradient de température s'établit ainsi entre deux points de la plaque. L'effet se cumule de proche en proche, et l'on peut ainsi atteindre une différence de température importante entre les deux extrémités de la plaque.

On doit enfin trouver un compromis pour évacuer la chaleur. Si cette évacuation est trop lente, la température du matériau et celle de l'air s'égalisent, et il n'y a plus de transfert thermique. Si les échanges sont trop rapides, le matériau garde une température presque uniforme, et les différences de températures sont trop faibles pour réaliser un réfrigérateur ou une pompe à chaleur. La plupart du temps, la régulation se fait par des plaques de cuivre, très bon conducteur de la chaleur, ou en faisant circuler de l'eau aux extrémités chaude et froide des plaques solides.

Du son à la chaleur... et inversement

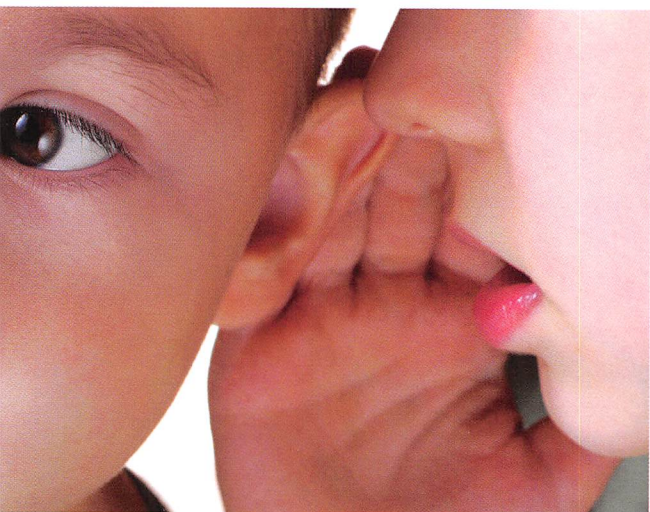
L'aspect remarquable des engins thermoacoustiques est qu'ils fonctionnent avec un gaz inerte, tel l'hélium, en circuit fermé (pas de pollution), sans pièces mobiles (pas de bruit, pas d'usure) et ont un rendement (chaleur transportée par watt dépensé) assez satisfaisant.

Au début des années 2000, un prototype a été envoyé dans l'espace sur la navette spatiale, un autre installé sur un destroyer américain pour refroidir ses radars, le fabricant américain de glaces *Ben & Jerrys* finançait le développement d'un prototype de réfrigérateur thermoacoustique, etc. Mais de tels appareils ne sont pas encore apparus sur le marché, signe que des problèmes techniques ou de coût subsistent.

Notons enfin que, comme la plupart des machines thermiques, le réfrigérateur thermoacoustique peut aussi fonctionner à l'envers. Appliquons sur l'échangeur une différence de température supérieure à celle que provoque spontanément l'onde sonore : en se déplaçant, l'air comprimé rencontre une zone chaude et s'échauffe encore plus, ce qui augmente la pression. Autrement dit, l'onde sonore est amplifiée ! Selon l'application souhaitée, on peut alors convertir une partie de cette énergie acoustique en une autre forme d'énergie.

Plusieurs universités britanniques se sont associées pour mener à bien un projet de ce type, nommé SCORE (*Stove for Cooking, Refrigeration and Electricity*). Il s'agit de mettre au point une sorte de four polyvalent pour les pays en développement. Dans un premier élément thermoacoustique, un foyer de combustion produit une onde sonore, qui fait fonctionner un second élément, un réfrigérateur thermoacoustique ; une paroi placée entre les deux fait office de haut-parleur inversé, qui transforme une partie de l'énergie acoustique en courant électrique alternatif. Un prototype est aujourd'hui testé, notamment au Népal.

Bien reçu, bien entendu



Shutterstock / Sergey Lavintsev

L'oreille est d'une remarquable sensibilité.

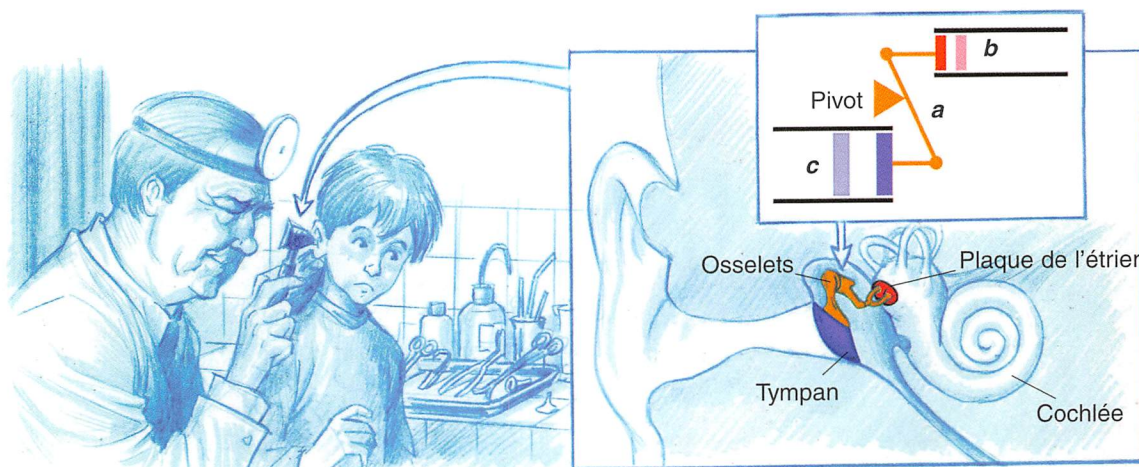
Cet organe décèle d'infimes oscillations de l'air, dont l'amplitude n'atteint que quelques dizaines de milliardièmes de mètre. Quelle est sa recette ?

Un millionième de millionième de watt : telle est la puissance sonore détectée par notre oreille lorsque nous entendons un murmure. Comment l'organe auditif perçoit-il d'aussi infimes vibrations de l'air ? Il capte l'onde sonore et la transmet intégralement jusqu'aux cellules ultrasensibles de la cochlée, dans l'oreille interne. La clef de la prouesse réside tant dans la transmission du son que dans sa détection.

Une gamme fort étendue

Les sons que nous entendons sont des vibrations de l'air de fréquence comprise entre 20 hertz et 20 000 hertz, mais certains animaux tels que les baleines ou les chauves-souris perçoivent les (ultra)sons jusque vers 150 000 hertz. Au passage d'une onde sonore, la pression de l'air oscille de part et d'autre de la pression atmosphérique ; la différence est nommée pression acoustique. L'amplitude de la pression acoustique est de 10^{-5} pascal (soit 10^{-10} atmosphère) pour un murmure, de 10 pascals pour le bruit d'un marteau-piqueur. L'étendue de la gamme audible est ainsi caractérisée par un facteur mille pour les fréquences et un million pour les amplitudes.

Les physiologistes ont constaté que lorsque nous comparons deux stimulus, nous discernons non pas leur différence algébrique, mais leur rapport. Les échelles appropriées pour décrire nos perceptions sont donc des échelles fondées sur les rapports, c'est-à-dire des échelles logarithmiques. Ainsi, les « intervalles » utilisés par les musiciens pour donner l'écart entre deux notes – leur hauteur relative – correspondent à des rapports de fréquences, et l'on nomme octave un intervalle correspondant à un doublement de la



1 L'oreille moyenne transmet les sons depuis l'air, dans l'oreille externe, au liquide contenu dans l'oreille interne. Ce transfert d'énergie acoustique d'un milieu à l'autre est efficace parce que l'oreille est équipée d'un dispositif à effet de levier, la chaîne des osselets (en orange, *a*). Grâce aux

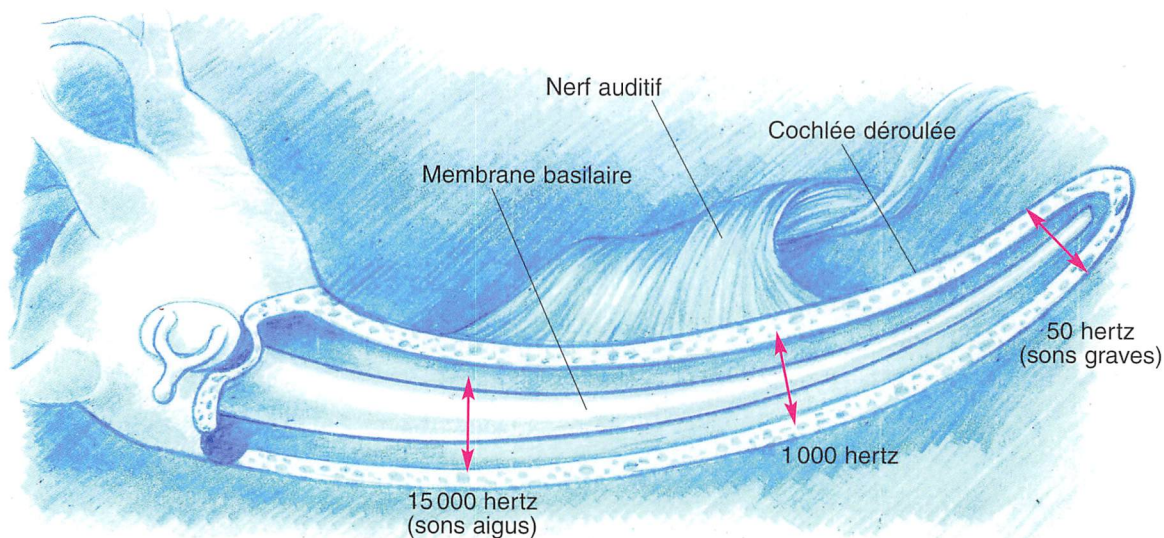
longueurs inégales de ceux-ci et au fait que l'aire de la plaque de l'étrier (en rouge, *b*) est inférieure à celle du tympan (en violet, *c*), ce dispositif réduit, dans le liquide de la cochlée, l'amplitude des vibrations tout en augmentant leur pression. Admirable évolution qui a amené ces perfectionnements !

fréquence. Notre perception de l'intensité des sons obéit à la même loi : nous percevons une même différence entre deux sons de puissances 1 et 10 qu'entre deux sons de puissances 10 et 100. Pour l'intensité des sons, c'est-à-dire l'énergie qu'ils transportent par unité de surface et de temps, l'unité appropriée est le bel : une différence de un bel, ou dix décibels (10 dB), correspond à un rapport d'intensités égal à 10. Comme l'intensité transportée est proportionnelle au carré de la pression sonore, une variation d'un facteur 10 de cette pression correspond à une variation d'un facteur 100 de l'intensité, soit 2 bels ou 20 décibels.

Comment le son est transmis...

Le zéro de l'échelle correspond à notre seuil de perception. Par convention, il est donné par une pression acoustique d'amplitude égale à 2×10^{-5} pascal. La parole correspond à des fréquences voisines du *la* du diapason, à 440 hertz (la tonalité du téléphone), et à des intensités de quelque 60 décibels. Ces caractéristiques situent la voix humaine au centre de notre fenêtre de perception (exprimée en échelle logarithmique). Lors d'une conversation normale, l'intensité sonore qui nous parvient est d'environ un millionième de watt par mètre carré, et correspond à des déplacements des couches d'air d'à peine 20 nanomètres (20 milliardièmes de mètre). La tâche de l'oreille ne s'annonce pas facile !

Dans une première étape, notre oreille externe – le pavillon – collecte toute la puissance parvenant sur une surface d'environ 10 centimètres carrés. Puis elle l'amène, *via* le canal auditif, au tympan, une membrane de quelque 60 millimètres carrés. Outre cette concentration de l'énergie sonore, le canal auditif, un tube d'environ trois centimètres de long,



2 La membrane basilaire de la cochlée ressemble à un ruban dont une extrémité est libre et qui divise la cochlée (ici déroulée) en deux parties. En la faisant vibrer, les sons excitent les cellules ciliées réparties sur sa surface. L'amplitude des vibrations dépend de

la fréquence sonore et de l'endroit considéré. Pour les sons aigus, la vibration de la membrane est maximale (double flèche rouge) près de sa base ; pour les graves, elle est maximale vers l'extrémité de la membrane.

joue le rôle d'une caisse de résonance dépendant de la fréquence. Il multiplie de près d'un facteur dix les sons aigus (à quelques kilohertz) par rapport aux sons graves. Pour les aigus, l'intensité sonore augmente ainsi de 20 décibels au niveau du tympan : nous percevons mieux les sons aigus que les sons graves.

Le son rencontre alors un obstacle, car il se transmet mal de l'air à l'eau et réciproquement. L'eau est 1 000 fois plus dense que l'air et beaucoup moins compressible. Aussi, pour une même intensité sonore, l'amplitude des oscillations de l'air est 60 fois supérieure à celle de l'eau tandis que l'amplitude de la pression acoustique de l'air est, au contraire, 60 fois inférieure. Les variations de pression suffisantes pour faire vibrer l'air ne provoquent que de faibles oscillations de l'eau. Ces différences font qu'une onde sonore passant de l'air à l'eau est en grande partie réfléchi vers l'air. La présence d'une simple membrane n'y changerait rien : seul un millième de la puissance sonore est transmis dans l'eau. Autrement dit, la perte est de 30 décibels.

Pour pallier cette difficulté, l'oreille comporte un dispositif mécanique agissant comme un levier, qui réduit le déplacement tout en amplifiant la pression (voir la figure 1). Ce dispositif inclut la chaîne des osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) situés entre le tympan et la plaque de l'étrier, qui est en contact avec le liquide physiologique de l'oreille interne. L'effet de levier est dû aux longueurs inégales des osselets ainsi qu'au fait que la surface de la plaque de l'étrier est 17 fois plus petite que la surface utile du tympan. Au total, ce dispositif multiplie la pression acoustique par un facteur 45. On gagne ainsi plus de 30 décibels, qui compensent la perte due au changement de milieu.

Parvenue au cœur de l'oreille, l'onde sonore provoque des variations rapides de la pression du fluide contenu dans la cochlée, un tube de 20 à 30 millimètres de long et enroulé en

spirale. Ces variations de pression font alors vibrer une cloison qui sépare la cochlée en deux dans le sens de la longueur: la membrane basilaire. C'est sa vibration qui nous permet de distinguer les sons. La membrane basilaire étant plus large et moins épaisse à son extrémité qu'à l'entrée, et par ailleurs beaucoup plus tendue à son sommet qu'à sa base, ses réactions mécaniques diffèrent selon l'endroit considéré.

...et comment il est détecté

En expérimentant sur des oreilles de mammifères morts et en réalisant des modèles mécaniques, le biophysicien d'origine hongroise Georg von Békésy (prix Nobel de physiologie en 1961) a mis au jour le comportement de la membrane basilaire. L'onde sonore qui se propage dans le liquide physiologique, de la base vers le sommet de la cochlée, excite les vibrations de la membrane basilaire avec une amplitude d'abord croissante. Puis, au-delà d'une certaine distance, l'amplitude décroît brusquement. La zone où la vibration de la membrane est maximale dépend de la fréquence de l'onde sonore. Les fréquences basses excitent plutôt l'extrémité de la membrane, les fréquences élevées sa base (*voir la figure 2*).

Les cellules ciliées qui se trouvent sur la membrane basilaire réagissent à ces vibrations et les amplifient. Leurs cils finissent par s'incliner de quelques millièmes de degré. Cela suffit à déclencher des signaux électriques que les nerfs transmettent au cerveau. Grâce à tous ces mécanismes, nous distinguons près de 20 000 sons différant par leur fréquence ou par leur intensité. Que d'ingéniosité pour entendre tant de sottises!



Sur un air de flûte

L'instabilité des jets d'air est parfois utile :
elle est au cœur de la production
des sons dans les orgues et les flûtes.

Pour produire une note, le trompettiste fait vibrer ses lèvres, le clarinettiste une anche de roseau et le violoniste une corde. Qu'en est-il du flûtiste ou de l'organiste ? Aucune pièce n'est ici mobile, que ce soit dans l'instrument ou au niveau de la bouche du musicien, et pourtant un son mélodieux est produit. Ce prodige est-il dû au seul tuyau de l'instrument, que l'on retrouve dans l'orgue, la flûte traversière ou la flûte de Pan ? Au XIX^e siècle, le physicien allemand Carl Friedrich Sondhausson a montré que non. En fait, le son naît de la vibration d'un jet d'air qui interagit avec un obstacle en forme de biseau.

Le biseau ne fend pas l'air

Que fait l'air dans une flûte à bec (*voir la figure 1*) ? Le musicien souffle dans une fente horizontale, qui forme un canal d'où jaillit un jet d'air large d'un centimètre et demi et très peu épais (de l'ordre du millimètre), analogue au jet d'eau obtenu en pinçant l'extrémité d'un tuyau d'arrosage. Après quelques millimètres de propagation dans l'air libre, ce jet d'air rencontre un obstacle en forme de biseau.

On pourrait croire que ce biseau aurait pour effet de diviser le jet d'air en deux, dans le sens de l'épaisseur. Des prises de vue réalisées en mêlant de la fumée à l'air ont montré qu'il n'en est rien. Le jet garde son intégrité et, telle une anche vibrante, il effectue des oscillations qui le font passer périodiquement de part et d'autre de l'arête du biseau, ce qui s'accompagne de tourbillons. En raison de cette turbulence, une partie de l'énergie du jet d'air se retrouve sous la forme d'ondes acoustiques, perçues comme un son dont la hauteur correspond à la fréquence des oscillations du jet de part et d'autre du biseau.

On retrouve un phénomène similaire dans des situations plus familières, tels le sifflement du vent à travers les lignes électriques ou le son produit lorsqu'on souffle sur un bout de papier. L'un des précurseurs de l'étude du «son de biseau» fut l'abbé Carrière de Toulouse, dont les travaux avaient contribué à montrer que le bruit du fouet est un bang supersonique. Ses expériences effectuées en 1925 ont prouvé qu'un son n'apparaît que si la vitesse du jet dépasse un certain seuil. Ensuite, lorsqu'elle augmente, la fréquence des oscillations s'accroît peu à peu, puis le son passe brusquement d'un son grave à un son plus aigu, et ainsi de suite. Comment expliquer cela ?

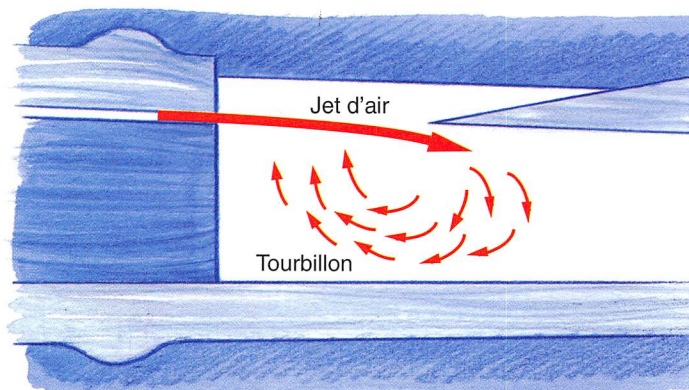
Lord Rayleigh a montré, dès 1894, qu'un jet d'air est fondamentalement instable : la moindre perturbation du jet s'amplifie exponentiellement le long de la direction de propagation jusqu'à le rendre turbulent et tourbillonnaire (même si l'écoulement était régulier au départ). Il suffit de se placer devant une conduite de refoulement dans une piscine pour s'en rendre compte avec un jet d'eau. Le bruit associé à l'air soufflé dans une flûte signe aussi ce passage à la turbulence. Alors qu'un écoulement libre ne produit qu'un bruit mal défini, composé de nombreuses fréquences sonores, la présence d'un biseau opère une sélection et transforme le bruit en un son de fréquence bien déterminée.

Imaginons que le jet d'air passe sous le biseau. Il chasse de son chemin de l'air auparavant immobile et, comme pour un jet libre soumis à une perturbation, un tourbillon naît et envoie de l'air en arrière, vers l'orifice dont est issu le jet (*voir la figure 2*). Cette perturbation soulève le jet d'air et le pousse vers le côté opposé du biseau. Cela

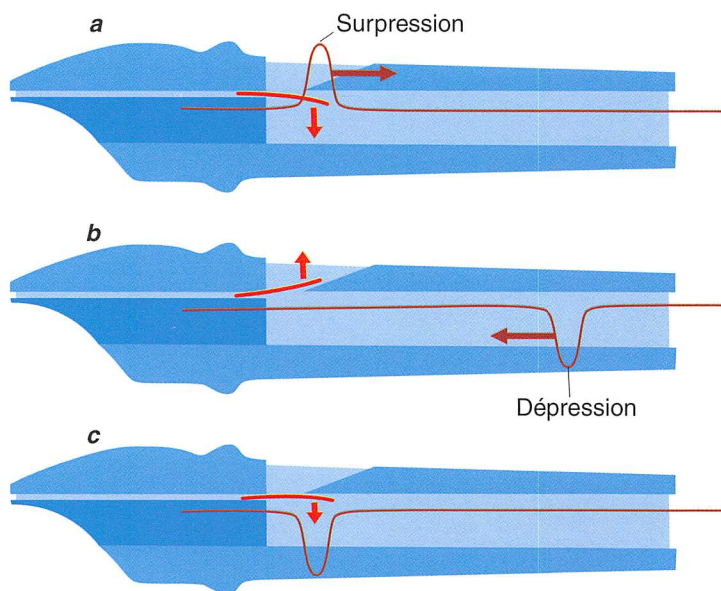


1 Dans une flûte ou dans un tuyau d'orgue, aucune pièce n'est mobile. Le son est produit par l'action d'une arête solide, ici un biseau, sur le jet d'air insufflé dans l'ins-

trument. Cette interaction conduit à une oscillation du jet d'air de part et d'autre du biseau. Mais le tuyau détermine pour une grande part les fréquences de cette oscillation.



2 Le jet d'air sortant du canal n'est pas fendu par le biseau, mais dévié d'un côté ou de l'autre de l'arête. De plus, l'écoulement est perturbé et, si la vitesse du jet dépasse un certain seuil, un tourbillon apparaît et ramène une partie de l'air en arrière, ce qui pousse le jet d'air verticalement et le fait changer de côté par rapport au biseau.



3 Le tuyau de la flûte joue le rôle de résonateur et détermine la fréquence d'oscillation verticale du jet d'air. La descente du jet crée une surpression qui se propage vers la droite [a]. Arrivée à l'extrémité de la flûte, où la pression doit être égale à la pression atmosphérique, cette surpression se réfléchit en devenant une dépression [b]. Son arrivée au niveau du bec doit coïncider avec le moment où le jet d'air entame de nouveau un mouvement descendant, de façon à aspirer l'air vers le bas [c].

fait, la situation s'inverse, et le processus se répète. Autrement dit, le jet se met à osciller de part et d'autre de l'arête du biseau.

Quelle est la période maximale de cette oscillation ? Elle est déterminée par le temps que met le tourbillon d'air pour aller du biseau, où il est créé, jusqu'à l'orifice. En effet, le jet d'air, qui est au début de sa phase descendante au moment de la formation du tourbillon, doit entamer sa phase ascendante lorsque le tourbillon l'atteint et le pousse vers le haut : cela correspond à une demi-période d'oscillation. Ce temps est approximativement égal à la distance orifice-biseau divisée par la vitesse initiale du jet d'air. Avec une séparation de cinq millimètres et une vitesse de jet d'air égale à dix mètres par seconde, la fréquence est de l'ordre de 1 000 hertz, parfaitement audible.

Le jet d'air fait yo-yo

Le raisonnement ci-dessus porte sur la période maximale d'oscillation, c'est-à-dire sur la fréquence minimale. Or le retour du tourbillon d'air reste en phase avec l'oscillation verticale du jet d'air même si celui-ci vibre trois fois plus vite, ou cinq fois, ou tout nombre impair (le jet effectue, en plus de la demi-oscillation, un nombre entier de cycles durant le trajet du tourbillon). Pour une vitesse de jet donnée, les fréquences d'oscillation possibles sont ainsi des multiples impairs de la fréquence fondamentale.

C'est le degré d'instabilité du jet qui détermine, parmi les fréquences possibles, celle choisie par le système. Chaque passage de la lame d'air au niveau du biseau crée un tourbillon. Les tourbillons sont donc d'autant plus nombreux que la fréquence est élevée. Lorsque le flûtiste augmente la vitesse du jet d'air, l'instabilité

de l'écoulement grandit et la fréquence d'oscillation augmente, sautant brusquement d'une des fréquences possibles à la suivante – d'où les sauts dans la hauteur du son.

Mais quand on joue de la flûte, entend-on le son du biseau ? Le jet d'air joue, pour l'air dans le tuyau, le même rôle que l'anche d'une clarinette. Or c'est le tuyau résonateur qui impose sa loi et modifie en conséquence les fréquences d'oscillation de la lame d'air. Il fournit en effet un mécanisme de rétroaction plus puissant que les retours de tourbillons évoqués précédemment, car la propagation du son dans le tuyau est un phénomène purement acoustique – qui engendre des champs de pression bien plus intenses que les écoulements hydrodynamiques dont il était question auparavant.

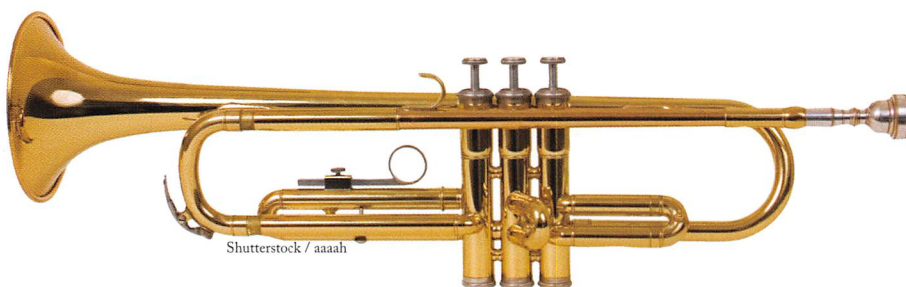
Quand le tuyau impose sa loi

C'est la durée d'un aller-retour de l'onde acoustique dans le tuyau qui fixe la hauteur du son. Imaginons par exemple la lame d'air glissant sous le biseau et raisonnons en termes de pression : elle engendre au niveau du biseau une surpression qui se propage le long du tuyau (*voir la figure 3*). Si l'extrémité du tuyau est ouverte (cas des flûtes), la pression y est constante et égale à la pression atmosphérique. Ce nœud de pression agit comme un miroir : la surpression est en partie réfléchi sous forme d'une dépression qui se propage en sens inverse et retourne vers le bec. Cette dépression amplifiera le mouvement de la lame d'air si son arrivée au niveau du biseau coïncide avec une période d'oscillation : la lame d'air est aspirée vers le bas au moment même où elle s'apprête à glisser sous le biseau.

Dans cette géométrie simple, la fréquence obtenue est le double de la longueur du tuyau divisée par la vitesse du son, et peut différer notablement de la fréquence propre du biseau. En pratique, l'obtention d'un son intéressant, riche en harmoniques, nécessite bien des ajustements – de la position du biseau par rapport au canal, de la largeur des ouvertures, etc. Et le flûtiste (ou le clarinettiste) a aussi sa part avec les couacs : ils se produisent aux moments où la lame d'air (ou l'anche) ne subit plus le joug du tuyau, mais vibre à sa fréquence propre.

Le profil des instruments à vent

Quelle forme donner aux instruments à vent ? Le choix, qui relève tant de la physique que de la musique, se limite aux tubes cylindriques ou coniques.



Dans un instrument à vent, les vibrations de l'air produites au niveau du bec sont à l'origine des sons émis. La hauteur de la note est souvent mise en relation avec la longueur de la colonne d'air, mais on parle rarement de l'influence du profil de l'instrument. Pourtant, si bois et cuivres exhibent une grande variété d'aspects, leurs corps sont des tubes uniquement cylindriques, comme pour la clarinette, ou coniques, comme pour le saxophone. Ces choix ne découlent pas seulement de la simplicité de fabrication. Ils reposent aussi sur de subtiles contraintes physiques et musicales.

Pas de gamme pour le clairon

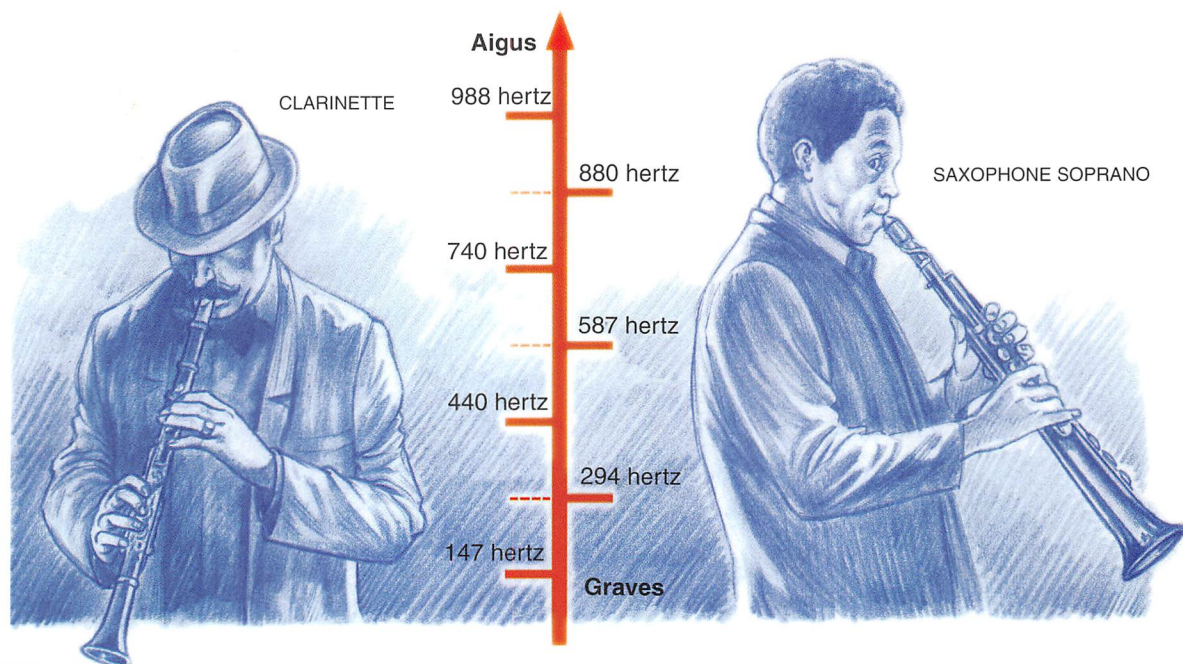
Que demande-t-on à un instrument de musique ? De permettre à l'instrumentiste de jouer des mélodies à partir des notes d'une gamme. La hauteur de chaque note correspond à une fréquence de vibration de l'air, et l'intervalle musical compris entre deux notes est fixé par le rapport de leurs fréquences. Un saut d'une octave vers les aigus correspond ainsi à un doublement de la fréquence. La gamme occidentale se divise en 12 demi-tons égaux : deux notes successives – par exemple un *do* et un *do dièse* – ont donc des fréquences dans un rapport égal à la racine douzième de 2, soit 1,0595... .

Pour faire un instrument à vent qui produise toutes les notes, une première idée est d'utiliser un tube différent pour chaque note, comme pour la flûte de Pan. La solution est efficace, mais musicalement limitée : les arpèges sont difficiles à jouer. Par ailleurs, un même tube peut produire des notes distinctes, comme l'illustre le clairon, dont un bon instrumentiste peut tirer jusqu'à sept notes. De quoi jouer *Aux Morts* (quatre notes) en l'honneur des disparus, mais guère plus.

Cette pauvreté musicale résulte du principe même du clairon et d'autres instruments tels le didjeridoo australien ou la trompe suisse : le son émis résulte des vibrations de la colonne d'air du corps de l'instrument. Ces vibrations, créées par les lèvres du musicien, se réfléchissent à l'extrémité ouverte de l'instrument. Elles effectuent de multiples allers et retours et seules subsistent celles pour lesquelles les ondes réfléchies viennent renforcer les ondes émises : le nombre de vibrations de l'air au niveau du bec pendant un aller-retour de l'onde sonore est alors un entier.

À chaque entier une note, mais laquelle ? La réponse est plus délicate qu'il n'y paraît, car la vitesse de propagation du son dans un tuyau dépend de la fréquence de l'onde et du profil du tuyau... sauf lorsqu'il s'agit d'un cône ou d'un cylindre, où le son se propage tout comme dans l'air libre, à 340 mètres par seconde quelle que soit la fréquence. Pour ces deux profils, le résultat est simple : les fréquences des sons émis sont des multiples entiers de la fréquence la plus basse. Cette fréquence fondamentale est inversement proportionnelle à la longueur du corps de l'instrument, corrigée pour prendre en compte les effets du bec et du pavillon.

Le clairon est un tube conique replié sur lui-même, long d'environ 120 centimètres. Sa fréquence fondamentale est de 131 hertz, mais la note correspondante est difficile à produire. En ajustant la tension de ses lèvres, le musicien peut en revanche facilement jouer les harmoniques successifs à 262 hertz, 392 hertz ... Ces sons sont bien des notes de la gamme, mais entre les deux premières fréquences jouables du clairon (un facteur 1,5),



1 La clarinette et le saxophone soprano illustrent les deux formes de base utilisées pour les instruments à vent. Le corps de la clarinette (à gauche) est cylindrique, celui du saxophone (à droite) est conique. Pour ces deux

profils, les fréquences des sons émis sont certains multiples entiers (ou presque) de la fréquence fondamentale, ce qui correspond à des sons musicalement intéressants.

il manque six notes; entre la deuxième et la troisième (fréquence multipliée par 1,33), il manque quatre notes, etc. Comment fabriquer un instrument à vent qui permette de jouer toutes les notes de la gamme?

Obtenir toute la gamme sur plusieurs octaves

Dans le principe, la réponse est évidente: puisque la longueur de l'instrument détermine les notes possibles, faisons varier la longueur! La solution la plus répandue est l'utilisation de pistons pour les cuivres, et de perces pour les bois. Dans une trompette, un piston actionné bouche le tuyau principal et ouvre une dérivation vers une coulisse. L'onde sonore doit ainsi parcourir une longueur de tube supplémentaire, ce qui abaisse la hauteur de la



2 Dans la trompette, des pistons permettent, par des dérivations vers des coulisses, d'allonger la colonne d'air et ainsi d'abaisser la hauteur de la note produite. Avec les

différentes combinaisons des trois pistons, on peut produire les six notes intermédiaires comprises entre la première et la seconde notes d'un instrument sans piston, tel le clairon.

note jouée. La trompette a trois pistons, qui libèrent des coulisses de longueurs égales respectivement à environ 6, 12 et 18 pour cent de la longueur du corps principal. Ainsi, en actionnant l'un de ces pistons, on abaisse la note jouée d'un demi-ton, d'un ton, ou d'un ton et demi. Par combinaisons, on produit six notes supplémentaires (d'un demi-ton à trois tons), les six notes qui manquaient à notre clairon entre la première note et la seconde!

Dans les bois, plutôt que d'allonger la colonne d'air, le musicien la raccourcit en débouchant les trous percés le long de l'instrument. Celui-ci se comporte alors comme s'il avait été sectionné au niveau du premier trou ouvert à partir du bec.

Cependant, le problème n'est qu'en partie résolu. Nous avons oublié un point délicat : si les pistons ou les perces ont été conçus pour compléter la gamme entre les deux premières notes naturelles de l'instrument, il faut aussi qu'ils puissent de même compléter la gamme entre la deuxième et la troisième notes. Cela impose que les rapports des fréquences des notes successives ne dépendent pas de la longueur du tuyau.

C'est bien le cas pour le cône et le cylindre, mais existe-t-il d'autres profils ? La réponse est oui. Découverts par l'acousticien américain Arthur Benade en 1959, ces « pavillons de Bessel » ont une section qui augmente comme une puissance de la distance au bec. Hélas, à l'exception de pavillons très évasés, inadaptés en pratique, les rapports entre les fréquences des notes produites ne sont pas nécessairement entiers, car la vitesse du son dans le pavillon dépend de la fréquence. Par exemple, si l'on prend une section en racine carrée de la distance au bec, la fréquence de la deuxième note est 2,295 fois la fréquence fondamentale, et 3,598 fois pour la troisième note. Ces fréquences ne correspondent pas aux notes de la gamme et ne sont pas musicalement intéressantes.

Ainsi, en pratique, seuls le cône et le cylindre permettent de faire des instruments à vent. On retrouve toutefois la forme des pavillons de Bessel dans les pavillons des cuivres : en modifiant la manière dont le son est réfléchi à l'extrémité ouverte, ils contribuent notablement au spectre de l'instrument. Ils transforment ainsi la série d'harmoniques *a priori* impairs du corps principal de la trompette (cylindrique comme la clarinette) en série comportant tous les harmoniques. Cette variété des pavillons disparaît pour les bois, car les perces court-circuitent le pavillon et diminuent son influence sur le spectre de l'instrument.

Le didgeridoo, un tuyau chantant

D'un simple tube de bois, les aborigènes australiens tirent des sons d'une grande variété : le didgeridoo combine le jeu de trompette et celui de la voix humaine.



Avec une branche d'eucalyptus creusée par des termites, les aborigènes australiens réalisent un instrument de musique au jeu riche : le didgeridoo. Fruit des hasards de la nature, chaque exemplaire est différent des autres. Et pourtant, malgré la multiplicité des formes et des tailles, tous les didgeridoos partagent un timbre caractéristique. Comment expliquer cette singularité parmi les instruments à vent ?

Pour fabriquer un didgeridoo, les aborigènes australiens choisissent une branche évidée par des termites, d'environ six centimètres de diamètre et un mètre et demi de longueur. Puis, avec de la cire d'abeille, ils façonnent à l'une des extrémités une embouchure. L'instrument est prêt.

On joue du didgeridoo en appliquant les lèvres sur l'embouchure et en les faisant vibrer en soufflant, comme sur une trompette ou un tuba. Pour changer le timbre ou la hauteur du son produit, point de trous, de clefs, ni de pistons : il suffit de souffler plus ou moins fort et de modifier le pincement des lèvres ou la position de la langue dans la bouche.

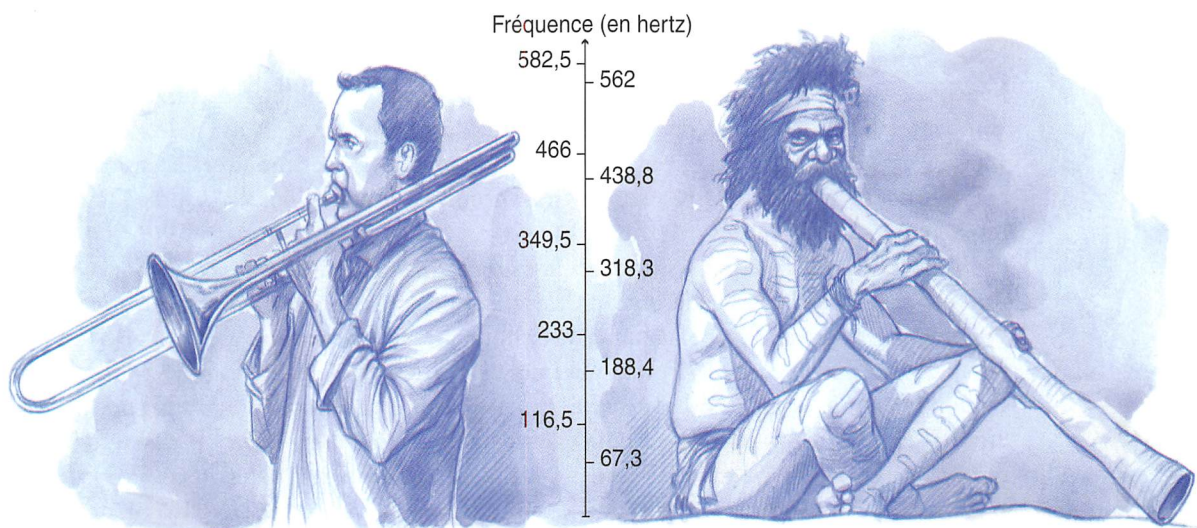
Au premier abord, le didgeridoo est un tuyau fermé à une extrémité par la bouche et ouvert à l'autre. Tel le cor de chasse, il n'est pas accordable et émet la note qui correspond à son mode fondamental : un son dont la période ondulatoire vaut deux fois la durée de l'aller-retour du son dans le tube – deux fois et non une car, lors de sa réflexion au niveau de l'extrémité ouverte, l'onde de pression repart avec une amplitude opposée. Pour notre didgeridoo typique, cela donne une fréquence inférieure à 60 hertz, qui correspond à une note très grave (comme dans une contrebasse). C'est la fréquence du son de base, nommé bourdon.

Trompette aléatoire

Pour comprendre l'émission du son, revenons sur le principe du bourdonnement que chacun peut expérimenter avec sa bouche. Soufflons en maintenant les lèvres fermées et tendues. La surpression créée dans la bouche, d'environ un centième d'atmosphère, écarte les lèvres; lorsqu'elles s'entrouvrent, les pressions s'égalisent entre l'intérieur et l'extérieur et les muscles labiaux ramènent les lèvres en position; la bouche se referme, où la surpression peut de nouveau s'installer, et ainsi de suite. Aidées par des effets aérodynamiques, les lèvres se mettent à vibrer.

Répétons l'expérience en plaquant les lèvres à l'embouchure d'un didgeridoo ou d'un cor. Les variations de pression produites par l'ouverture et la fermeture des lèvres se propagent dans le tube, se réfléchissent et reviennent interagir avec la bouche de l'instrumentiste. Pour la plupart des fréquences de vibration, cette action en retour perturbe les vibrations des lèvres et les entrave. En revanche, pour certaines fréquences particulières, les fréquences propres du tube, l'action en retour favorise les vibrations. Il est ainsi possible de faire résonner le tuyau à d'autres fréquences que la fréquence fondamentale.

Pour le cor de chasse, cylindrique, les fréquences possibles sont des harmoniques de la fréquence fondamentale, c'est-à-dire des multiples entiers de cette fréquence. En modifiant la tension des lèvres et en les faisant vibrer plus rapidement, l'instrumentiste peut ainsi changer de note, ou modifier le timbre de l'instrument et produire par exemple un son plus «cuivré» en augmentant la proportion des harmoniques présents dans le son émis.



1 Le trombone à coulisse est constitué d'un tube cylindrique bien régulier et, de ce fait, le son qu'il produit contient une fréquence de base (116,5 hertz pour un trombone en si bémol) et ses multiples entiers (*fréquences de gauche*). Le didgeridoo n'est qu'approximativement cylindrique et son

intérieur, creusé par des termites, est irrégulier. Les fréquences représentées dans le son qu'il produit (*à droite*) ne forment pas une série harmonique (ce ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale) et diffèrent d'un instrument à l'autre.

Et pour le didgeridoo ? Les termites n'étant pas des architectes de style rectiligne, la géométrie de la section intérieure de l'instrument est aléatoire. Il s'ensuit que les fréquences propres successives ne suivent pas une série harmonique. En prenant comme unité la fréquence fondamentale, un didgeridoo donné aura comme fréquences propres successives par exemple 2,8 - 4,7 - 6,5 - 8,3 ..., tandis qu'un autre présentera la série 2,7 - 4,8 - 6,4 - 8,6 ... De plus, le matériau étant beaucoup plus irrégulier et moins rigide qu'un métal, les pertes d'énergie acoustique dans le tube sont plus importantes et les résonances bien moins prononcées, en particulier à haute fréquence : l'amplification est moins importante, mais couvre un intervalle de fréquences plus large.

Ainsi, alors que pour les cuivres, le son de base contient la fréquence fondamentale et ses harmoniques, ce n'est pas le cas pour le didgeridoo. Les premiers harmoniques de cet instrument ne sont en effet pas des fréquences propres. Ne sont présents que les harmoniques d'ordre élevé, dont la fréquence tombe dans une résonance suffisamment large. Il en résulte un bourdon qui ne sonne pas cuivré, immédiatement reconnaissable en raison de l'absence des premiers harmoniques.

Jouer avec la voix

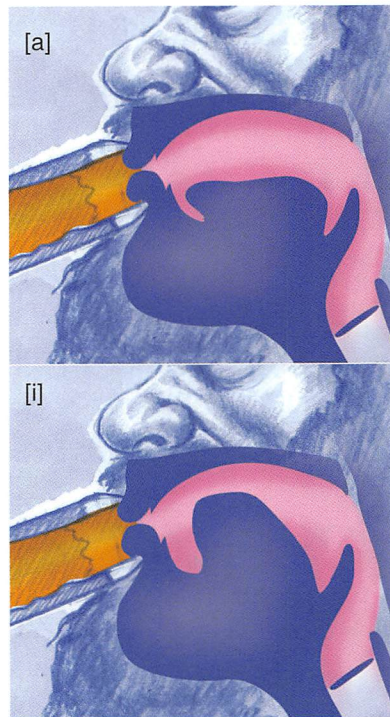
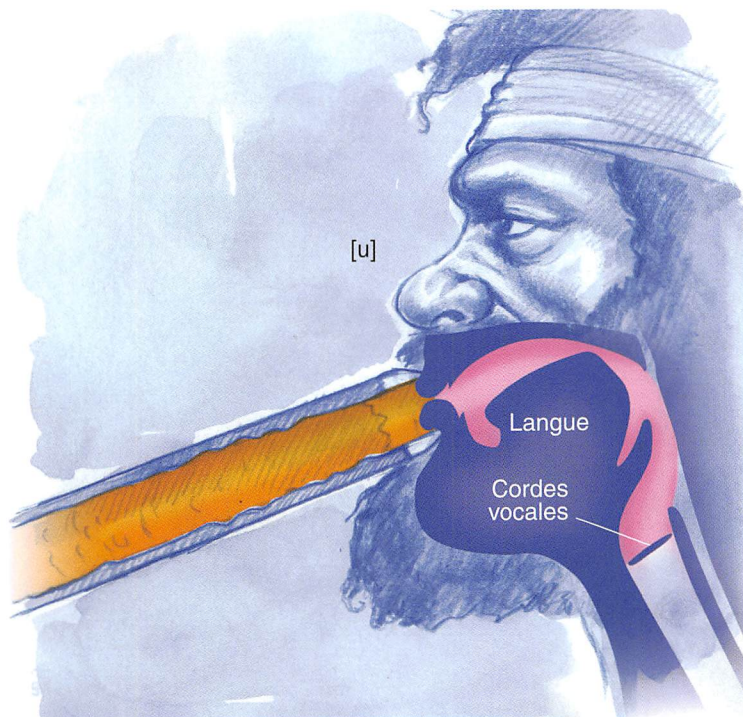
Une seconde caractéristique du didgeridoo permet de modifier notablement la composition du son émis. Que ce soit dans les cuivres ou le didgeridoo, les vibrations des lèvres produisent des ondes sonores se dirigeant vers le tube de l'instrument, mais aussi vers l'intérieur de la bouche.

Pour les cuivres, l'amplitude des vibrations de l'air est beaucoup plus importante dans le tube que dans la bouche, car le diamètre du tube est plus petit que la taille de la bouche. Par conséquent, c'est l'effet en retour des vibrations de l'air dans le tube qui détermine le son de l'instrument.

En revanche, la section d'un didgeridoo est comparable aux dimensions de la bouche : les ondes sonores dans le tube et dans la bouche ont des caractéristiques comparables. L'effet de la modification du conduit vocal est alors sensible. Avec une trachée close par les cordes vocales, longue d'environ 17 centimètres, la réponse du conduit vocal présente des résonances très atténuées (car la chair est souple !) à environ 500 hertz, 1 000 hertz, 1 500 hertz, etc.

Mais en modifiant la position de la langue, on peut déplacer ces résonances et prononcer les voyelles (par définition des sons tenus, à la différence des consonnes). Si l'on peut distinguer les voyelles de la voix humaine, indépendamment de leur hauteur (fixée par les cordes vocales), c'est à cause des résonances principales nommées formants. Quand la langue est agencée pour faire un *u*, les résonances du conduit vocal sont à 320 et 800 hertz ; elles se déplacent à 1 000 et 1 400 hertz pour un *a*, etc. Il arrive avec le didgeridoo ce qui arrive avec les cordes vocales : si le bourdon est à 60 hertz, en plaçant sa langue de façon à produire un *u*, on va amplifier les harmoniques 5 et 13-14, proches des résonances de la trachée, et probablement atténuer les harmoniques 9-10-11, qui en sont éloignés. Un timbre caractéristique apparaît.

On peut même parler dans l'instrument : les aborigènes imitent ainsi des cris d'animaux. Dans ce cas, on doit ajouter, aux différents couplages acoustiques, celui des cordes vocales avec les lèvres. Il a pour effet de produire des sons en mélangeant les fréquences : si le joueur



2 Le son produit par un didgeridoo fait intervenir un couplage acoustique entre la cavité de l'instrument (*en orange*) et le conduit vocal (*en rose*). En modifiant sa voix,

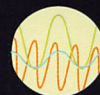
par exemple en modifiant la position de la langue pour prononcer les voyelles [u] (comme «ou»), [a] ou [i], le joueur peut considérablement moduler le son produit.

chante un do_3 grave, à 146 hertz (soit $5/2$ fois la fréquence fondamentale), la combinaison de fréquences donnera un son vers 30 hertz, soit une octave au-dessous du son de base. En général, un tel son n'est guère puissant, mais semble très présent à cause de la cascade harmonique, ce qui donne un timbre très râpeux.

Le contrôle du souffle et la maîtrise du conduit vocal par l'instrumentiste sont ainsi au cœur de la pratique du didgeridoo. Cela a même des vertus thérapeutiques. Des études récentes ont en effet montré que la pratique régulière de l'instrument constitue un traitement assez efficace de l'apnée du sommeil!



Du côté des ondes



Détecter, transmettre, disparaître,
reconnaître, réchauffer, cuire...

Les ondes servent à tout.

Shutterstock / Erlingur Brynjulsson

Une onde dans un lac.

Les retours de l'homme invisible



Wikimedia Commons

À défaut de se rendre transparent, jouer sur la réflexion de la lumière permet de ne pas être vu.

Deux F22, avions furtifs américains.

Éliminer l'opacité du corps, les spécialistes de l'imagerie médicale en rêvent. Ceux qui souhaitent se camoufler et se soustraire aux regards aussi ! Que proposer à ces grands timides ? Puisqu'il nous est impossible de devenir transparents à la façon de certains animaux marins, fabriquons des accessoires appropriés. Une bonne tenue de camouflage ? Il y a beaucoup mieux : une cape d'invisibilité, et ce n'est pas du cinéma (quoique, après réflexion...).

Devenir invisible est un projet fort ambitieux, car il faut éviter d'absorber, de réfléchir et de diffuser toute lumière. Ces conditions sont rarement remplies : le plexiglas est transparent, mais réfléchit une partie de la lumière, car son indice de réfraction diffère nettement de celui de l'air ; pour voir, les animaux marins ont besoin d'absorber de la lumière, et leurs yeux sont donc visibles (sans parler du contenu de leurs intestins)...

L'avion furtif réfléchit de travers

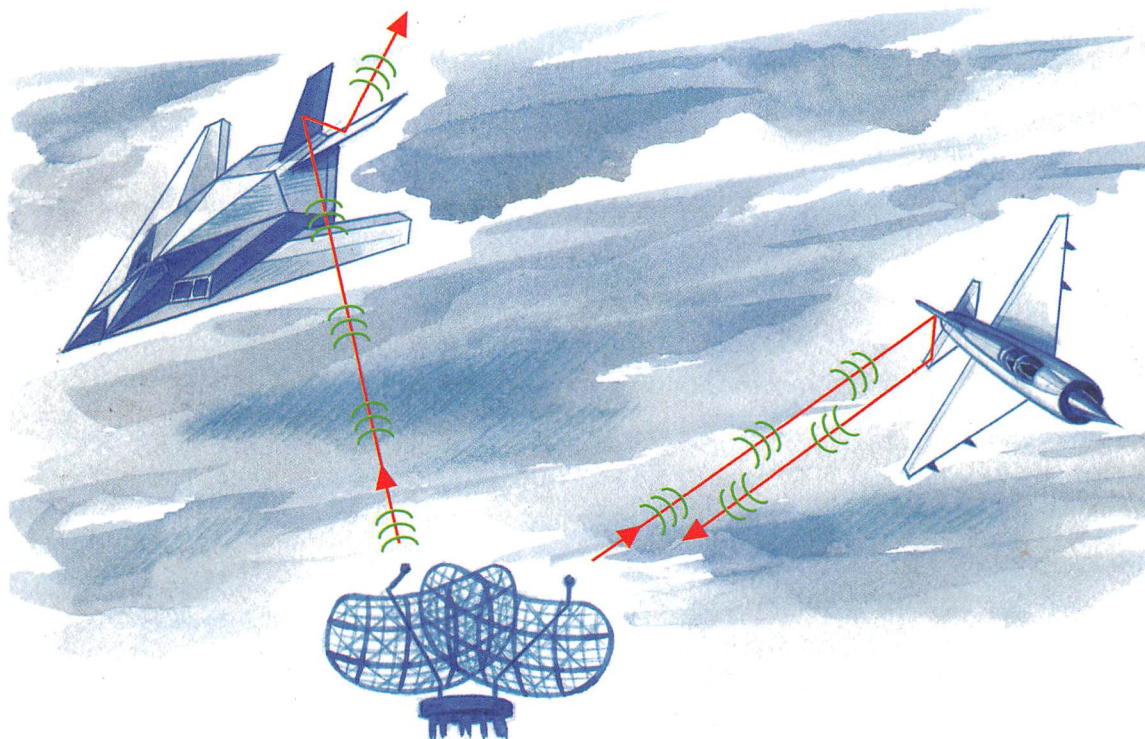
Soyons plus modestes et commençons par chercher notre manteau d'invisibilité du côté des avions ou bateaux furtifs. Il ne s'agit pas pour ces véhicules d'être totalement invisibles, mais d'échapper à la détection des radars. Pour cela, il leur faut éviter de réfléchir vers le radar les ondes que celui-ci a émises pour sonder le ciel. Première idée : utiliser des matériaux qui renvoient un minimum de rayonnement dans le domaine de fréquences utilisé. Des progrès ont été réalisés en ce sens, mais ils sont insuffisants.

Qu'à cela ne tienne. Évitions au moins que le rayonnement réfléchi par l'avion ne revienne vers le radar. Comment pouvons-nous contrôler cette réflexion ? Celle-ci est

purement spéculaire, c'est-à-dire que l'onde radar se réfléchit sur la surface de l'avion comme un rayon lumineux sur un miroir parfait, avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Elle n'est pas diffusée dans toutes les directions, car la surface n'est pas rugueuse à l'échelle de la longueur d'onde – centimétrique – du radar.

La forme géométrique de l'appareil joue alors un rôle essentiel. Une forme courbe, une sphère par exemple, renvoie un peu de rayonnement dans toutes les directions. En revanche, un plan ne réfléchit l'onde que dans une seule direction. Une sphère métallique au soleil nous renvoie invariablement un éclat, alors qu'un miroir ne nous éblouit que si son orientation est adéquate. C'est pourquoi les ingénieurs militaires ont privilégié, pour les avions furtifs, les surfaces planes. Tel un miroir, l'avion ne renvoie ainsi un écho vers le radar que si l'un de ses plans est bien perpendiculaire au faisceau du radar, situation très improbable. Les premiers avions furtifs, tel le F117, comportent uniquement des surfaces planes. Ils sont ainsi presque invisibles au radar, bien qu'ils soient un cauchemar pour les aérodynamiciens.

Les surfaces planes ne résolvent pas tout. Notamment, la dérive de l'avion, généralement verticale, et les ailerons de queue, horizontaux, cachent un piège. Cette configuration de deux plans perpendiculaires a une propriété particulière vis-à-vis de la réflexion des ondes. Pour mieux le comprendre, imaginons tout d'abord le coin d'un cube réfléchissant,



1 Pour réfléchir les échos radar dans une direction autre que celle de l'émetteur, donc de l'ennemi, un avion furtif a une forme adaptée, composée de plans. Il faut aussi éviter la

présence de plans orthogonaux : une telle configuration (*avion de droite*) renvoie les ondes dans leur direction initiale et ces ondes sont captées par le récepteur du radar.

vu de l'intérieur. Il est composé de trois plans perpendiculaires. Éclairé, un tel objet renvoie la lumière vers son point d'origine, quelle que soit la direction initiale du faisceau ! Ce dispositif est utilisé dans les catadioptres qui équipent les bicyclettes ou les voitures afin de mieux se signaler la nuit d'un véhicule qui approche. De tels réflecteurs ont aussi été déposés sur la Lune lors de la mission *Apollo XI* ; ils réfléchissent vers la Terre des rayons laser envoyés pour mesurer la distance Terre-Lune à moins d'un centimètre près.

Dans le cas d'un avion, l'association dérive-ailerons est constituée de deux plans orthogonaux et non de trois. Elle renvoie l'écho radar lorsque l'appareil est parfaitement de profil et incliné, situation fréquente lors des virages. Un avion furtif doit donc éviter d'avoir deux surfaces planes perpendiculaires. Ainsi, la dérive du F117 n'est pas verticale, mais composée de deux plans inclinés formant un V (*voir la figure 1*).

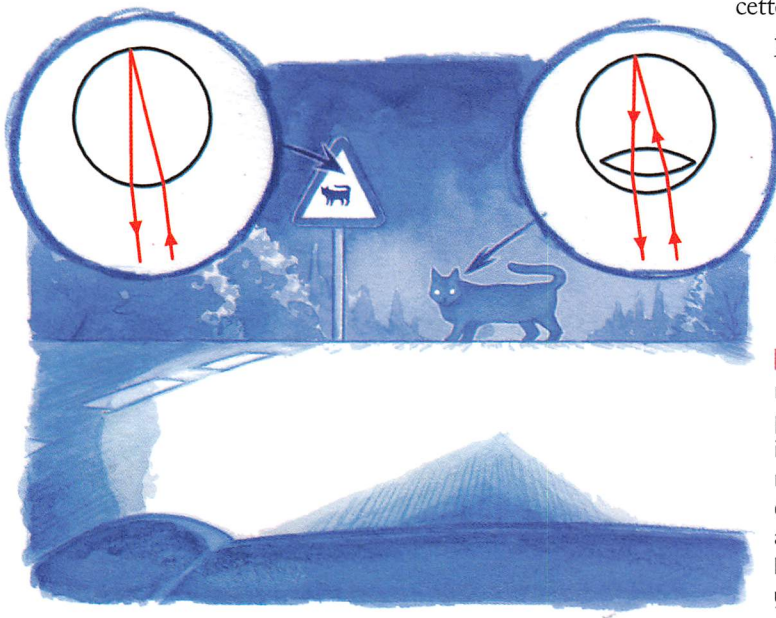
L'avion furtif n'est pas pour autant tiré d'affaire, car les ingénieurs ont mis au point des radars bistatiques : au radar émetteur-récepteur, on adjoint un second récepteur en un endroit distant. L'écho radar peut ainsi être détecté non seulement dans la direction de l'émetteur, mais aussi selon une autre orientation. Et des radars multistatiques, à plus de deux récepteurs, réduiront encore la furtivité...

Une cape d'invisibilité recouverte de rétroréflecteurs

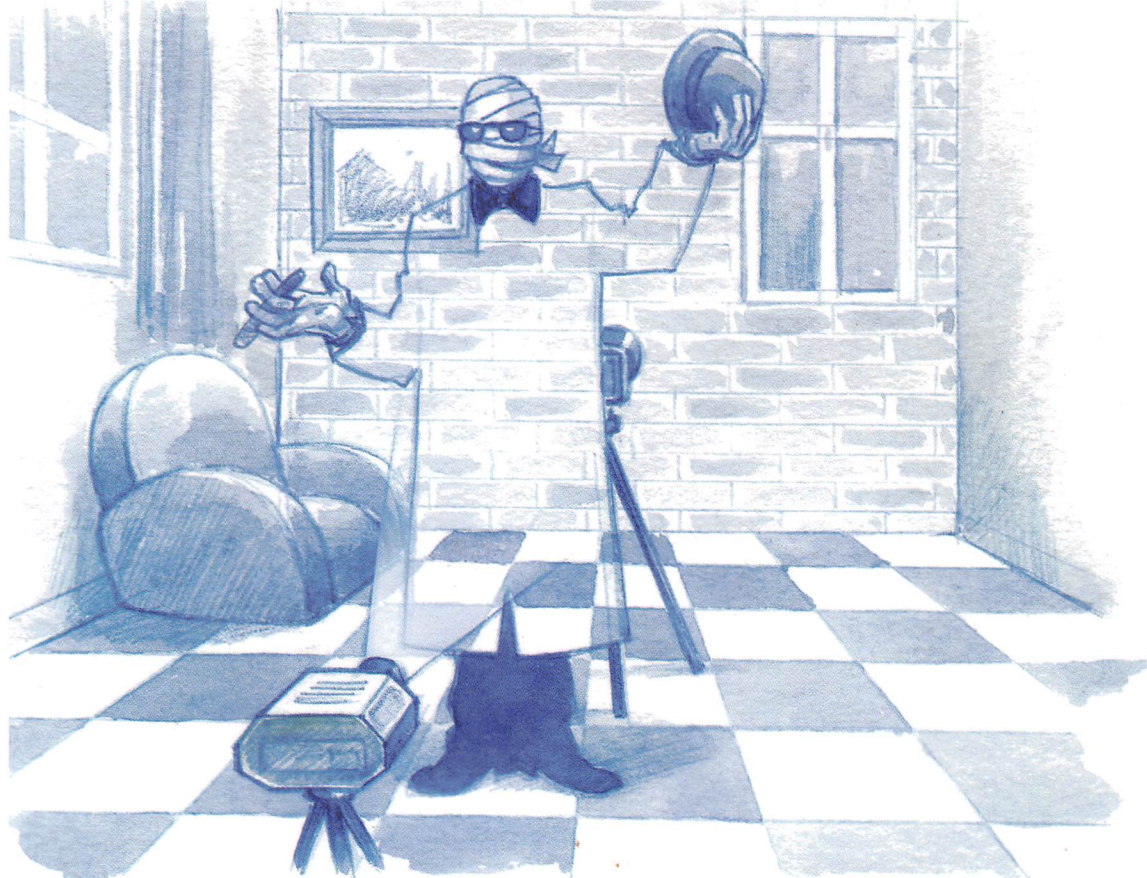
Les réflexions bien dirigées sont aussi la clef de l'invisibilité. Il est difficile de disparaître de la vue des autres, parce que les sources de lumière qui nous entourent sont multiples. Éclairés de toutes parts, nous renvoyons de la lumière dans toutes les directions. Pour se dissimuler aux autres, une solution est de se fondre dans le décor, ce que fait naturellement le caméléon. Des tissus capables de changer de couleur sont à l'étude et pourraient l'imiter.

Mais l'ajustement de la teinte globale ne permet pas une dissimulation totale. Mieux vaut devenir transparent. Comment ? En reproduisant sur le devant de la personne l'image exacte de la scène qui se trouve derrière elle. Des chercheurs de l'Université de Tokyo développent

cette idée. Une caméra située derrière la personne filme la scène d'arrière-plan, et un projecteur projette cette même scène sur le devant de la personne qui souhaite se dissimuler (*voir la figure 3*). Était-ce le procédé utilisé pour rendre invisible la voiture de James Bond dans l'épisode *Meurs un autre jour* ?



2 Un panneau routier est bien visible la nuit par le conducteur, car il est recouvert de petites particules sphériques, dont la face interne postérieure est réfléchissante. Ces microbilles renvoient la lumière dans la direction d'où elle provient. Un effet analogue explique que les yeux du chat brillent quand on l'éclaire, la rétine de ces yeux étant réfléchissante.



3 Pour se rendre invisibles, des chercheurs japonais ont mis au point une cape recouverte de rétroreflécteurs, qui renvoient les rayons lumineux dans leur direction initiale. Une caméra vidéo filme la scène se

trouvant derrière la personne, et, simultanément, on projette ce film sur le devant de cette même personne. L'observateur a alors l'impression que le personnage est transparent.

Si cette personne porte un vêtement habituel, même blanc, cela ne marche pas : la quantité de lumière renvoyée dépend de l'orientation du tissu et on repère tout de suite les parties de face ou de biais. Les chercheurs japonais ont donc fabriqué une cape recouverte de minuscules rétroreflécteurs, qui renvoient la lumière du projecteur dans sa direction. Plutôt que des coins de cube, qu'on ne peut pas tailler très petits, on utilise des «yeux de chat». Il s'agit de sphères dont la surface postérieure est réfléchissante. Chaque sphère agit comme une lentille et focalise la lumière qu'elle reçoit en un point au fond, où elle est réfléchi. Pour le retour, le même effet de lentille renvoie cette lumière dans la direction incidente, dans l'autre sens (*voir la figure 2*). C'est ce qui se passe quand on éclaire un chat la nuit : ses yeux apparaissent tout à coup très lumineux parce que leur rétine, dont la surface est réfléchissante, a été éclairée selon la bonne direction.

Le procédé d'invisibilité développé par les chercheurs japonais est spectaculaire. Son seul (mais considérable) défaut est qu'il n'est, pour l'instant, efficace que dans une seule direction. Toutefois, grâce à la directivité de la réflexion, il est tout à fait envisageable de se rendre «transparent» dans plusieurs directions, en projetant sur la cape différentes images selon différents angles. D'efficaces dispositifs d'invisibilité devraient donc bientôt... apparaître sur le marché!

Radio FM ou radio AM?



Shutterstock / Speed van der Wal

Il existe deux méthodes pour transmettre du son à l'aide d'ondes radio. L'une est peu sensible aux parasites, l'autre autorise davantage de canaux.

Quand on se sert d'un poste de radio, on doit d'abord choisir la gamme de fréquences, en général étiquetée FM ou AM, puis la fréquence de la station souhaitée. En fait, il ne s'agit pas d'une fréquence unique, mais d'un « canal », un petit intervalle de fréquences. Sa largeur limite le nombre de canaux disponibles, donc le nombre de chaînes radiophoniques. De quoi dépend la largeur d'un canal ? Et que signifient les abréviations FM et AM ?

La voix ou la musique sont des ondes sonores, associées à des variations de la pression de l'air. Elles s'atténuent rapidement en se propageant. Pour les transmettre au loin, une première solution a été trouvée par l'orthophoniste américain Graham Bell en 1876. Grâce à un microphone, les variations de pression sont converties en un signal électrique transmis par des fils de cuivre et que l'on peut amplifier si nécessaire. C'est le principe du premier téléphone (*voir la figure 1*). Mais ce procédé a ses limites : il nécessite une liaison matérielle entre la source et l'auditeur, cette liaison ne peut transmettre qu'une seule conversation à la fois et la qualité de la transmission est rarement au rendez-vous, le signal étant très sensible aux parasites électriques. Et surtout, cette méthode est mal adaptée à la diffusion d'un même message à de nombreux destinataires. Comment faire mieux ?

Pour envoyer un signal à distance, une technique fort ancienne consiste à cacher et révéler alternativement la lumière d'une lanterne. Dans cette situation, un signal de « basse fréquence », les occultations de la lumière, est porté par une onde de « haute fréquence », celle de la lumière (de l'ordre de 10^{15} hertz dans le visible).

Gardons cette idée du transport du signal par une onde de haute fréquence, mais, plutôt que la lumière, utilisons des ondes radio. Ces ondes électromagnétiques, dont la gamme de fréquences va du kilohertz au gigahertz, traversent certains obstacles et en contournent

d'autres grâce au phénomène de la diffraction. Celles de basses fréquences peuvent même faire le tour de la Terre en se réfléchissant sur l'ionosphère.

Comment coder du son avec une onde électromagnétique ? La méthode la plus simple consiste à moduler l'amplitude d'une onde monochromatique (de fréquence unique), dite porteuse, c'est-à-dire à multiplier l'amplitude de cette onde par l'amplitude du signal à transmettre. Cela signifie que la puissance du signal émis suit les mêmes variations temporelles que la pression de l'onde acoustique (*voir la figure 2*). L'onde électromagnétique résultante n'est alors plus monochromatique : on montre que c'est une superposition d'ondes, dont les fréquences sont voisines de celle de l'onde porteuse.

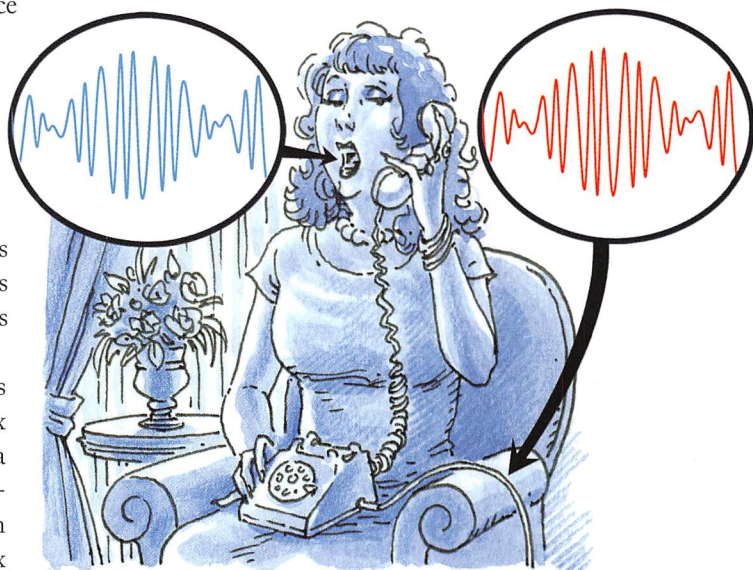
AM ou l'amplitude modulée

Considérons par exemple la transmission du *la* du diapason, une onde sonore de 440 hertz, au moyen d'une onde radio de 220 kilohertz. L'onde modulée en amplitude (ou AM pour l'anglais *amplitude modulation*) produite par l'émetteur radio est la superposition de trois ondes : la porteuse et deux autres ondes, nommées raies latérales, dont les fréquences sont à 440 hertz de distance de part et d'autre de la fréquence porteuse (soit 219,56 et 220,44 kilohertz).

Lorsque le son à transmettre n'est pas purement sinusoïdal, le résultat est similaire, mais toutes les fréquences composant le son interviennent. C'est pourquoi, pour transmettre le signal dans de bonnes conditions, on doit attribuer une bande de fréquences à chaque porteuse. Si l'on veut transmettre la voix humaine, la gamme acoustique allant de 0,3 à 3,4 kilohertz suffit, ce qui nécessite une bande électromagnétique large de 7 kilohertz. La transmission de la musique nécessitera plutôt une largeur de bande de 40 kilohertz.

Les ondes radio émises occupent ainsi une portion du spectre centrée sur la fréquence porteuse. Toutes les fréquences de cette région sont utilisées et ne sont pas disponibles pour d'autres transmissions. Pour cette raison, et afin que les multiples communications ne se brouillent pas, le spectre électromagnétique a été découpé en canaux de fréquences et de largeurs bien déterminées, répartis entre les utilisateurs potentiels par des conventions nationales ou internationales.

Le spectre étant limité, n'est-il pas possible de réduire la largeur des canaux pour en augmenter le nombre ? La réponse est oui. En modulation d'amplitude, on a vu qu'un son sinusoïdal est en fait codé par deux ondes radio : les deux raies latérales. Il y a donc redondance d'information. En outre, la porteuse elle-même ne contient aucune information, et



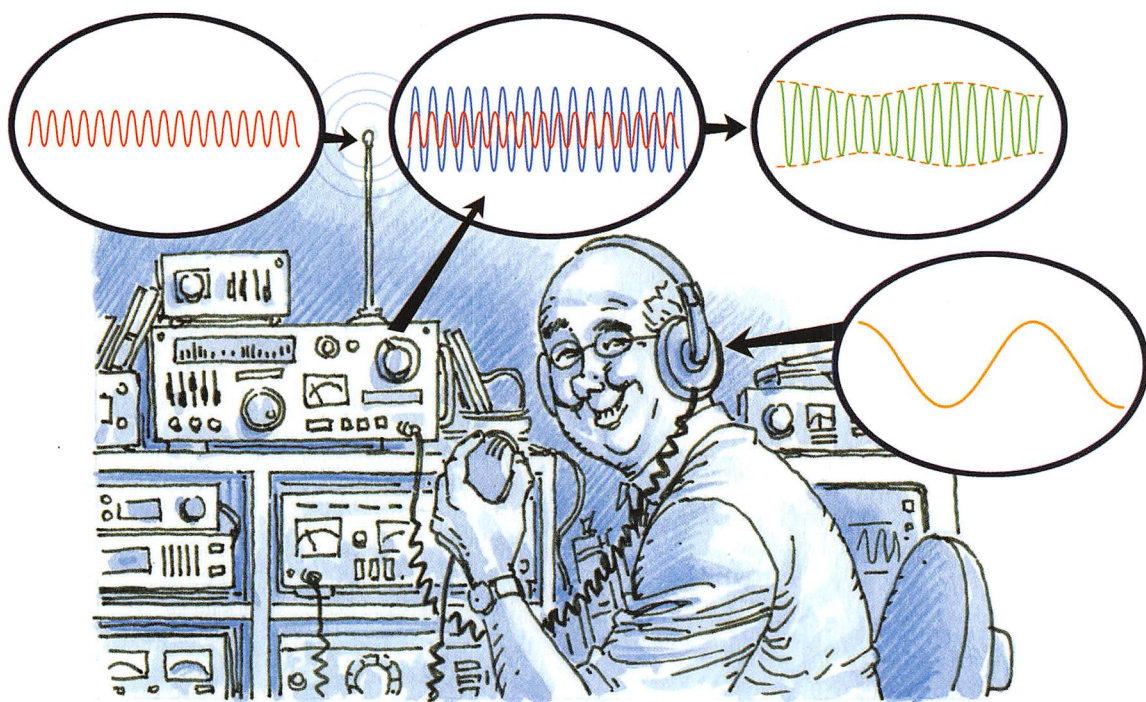
1 Dans un téléphone classique, les variations de pression associées à l'onde sonore (*en bleu*) sont converties en un signal électrique (*en rouge*) qui varie de la même façon.

pourtant, elle représente près des deux tiers de l'énergie émise. Qu'à cela ne tienne: émettons seulement l'une des deux raies latérales et passons-nous de la porteuse et de l'autre raie latérale. C'est le principe de la modulation BLU (pour *bande latérale unique*), bien connue des radio-amateurs, des plaisanciers ou des cibistes (avec leur canal unique autour de 27 mégahertz).

Cette méthode minimise à la fois la puissance d'émission et l'encombrement spectral (pour la BLU maritime, par exemple, la largeur du canal est de 2,7 kilohertz). En revanche, le récepteur doit produire localement la porteuse pour restituer le signal. Cela nécessite un oscillateur très stable, à 100 hertz près, donc un récepteur plus perfectionné que les simples postes de radio.

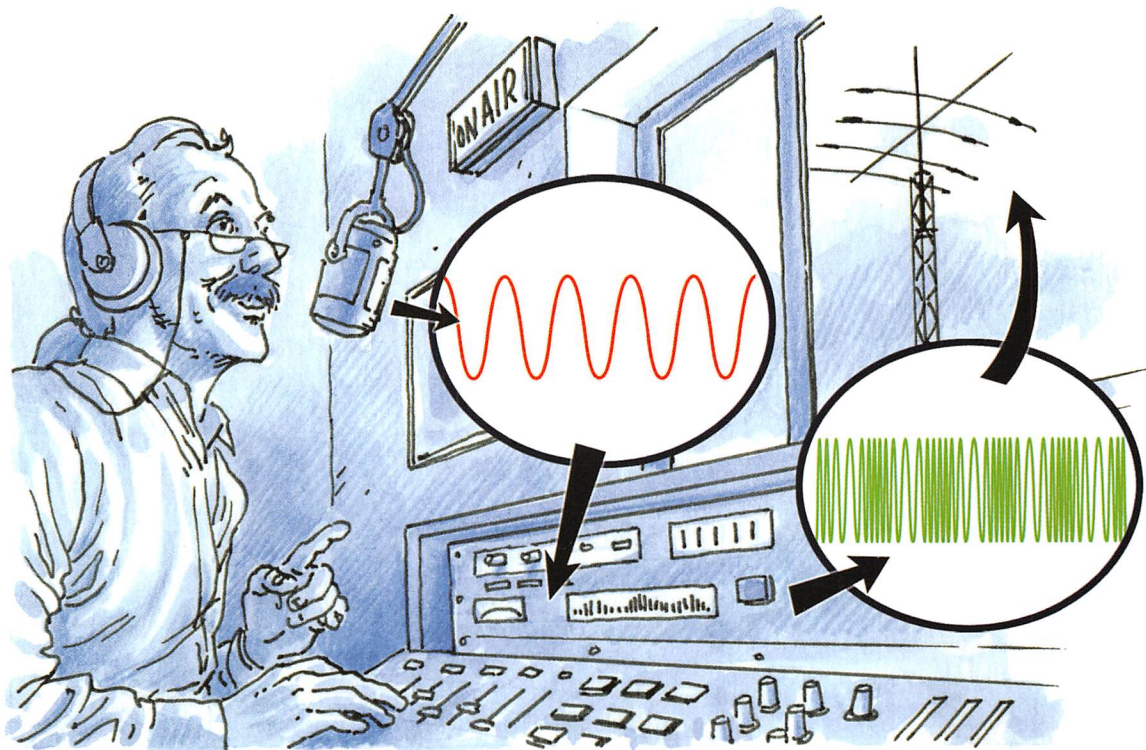
Moduler la fréquence

La modulation d'amplitude, BLU ou pas, n'évite pas les affreux grésillements de certaines retransmissions. Comment éviter de telles perturbations et transmettre un signal de bonne qualité? En utilisant la modulation de fréquence (FM), proposée par l'Américain Edwin Armstrong en 1935. Le principe revient à émettre un signal de fréquence variable,



2 En modulation d'amplitude (AM), c'est l'amplitude de l'onde radio qui code l'information à transmettre. Dans le mode BLU (pour *bande latérale unique*) qui en est une variante, l'onde reçue (en rouge) est superposée à une onde porteuse (en bleu) produite

par le récepteur lui-même. Le résultat de cette superposition est une onde modulée (en vert) dont l'enveloppe (en pointillés) correspond au signal qu'il fallait transmettre (onde entendue dans le casque, en orange).



3 En modulation de fréquence (FM), l'amplitude du signal à transmettre (*en rouge*) est traduite en variations de la fréquence de l'onde radio émise (*en vert*). Cette onde modulée équivaut à la superposition d'un grand nombre d'ondes

sinusoïdales de fréquences différentes. Une perturbation affectant l'une de ces composantes n'a donc que peu d'effet sur le signal global: la modulation de fréquence est moins sensible aux parasites que la modulation d'amplitude.

dont la valeur est la somme d'une fréquence de référence (la porteuse) et d'un terme proportionnel à l'amplitude instantanée du signal à transmettre. La valeur maximale du changement de fréquence de l'onde est l'«excursion en fréquence»: c'est l'écart en fréquence qui correspond à l'amplitude maximale que l'on veut transmettre.

Comme pour la modulation d'amplitude, le signal émis n'est pas une onde monochromatique, mais équivaut à une superposition d'ondes de fréquences différentes. Dans le cas de la transmission en FM du *la* du diapason, l'onde modulée est ainsi composée de toute une famille d'ondes sinusoïdales aux fréquences espacées deux à deux de 440 hertz.

Pour la modulation de fréquence de haute-fidélité, la fréquence porteuse est comprise entre 88 et 108 mégahertz, et l'excursion en fréquence est de 75 kilohertz. Ainsi, un *la* du diapason d'amplitude maximale fait intervenir dans sa transmission plus de 100 raies différentes. Par conséquent, si l'une de ces raies est perturbée, le signal global est peu affecté. C'est aussi cela qui permet de se verrouiller sur une station de radio donnée lorsque sa fréquence est proche d'une autre. Autre avantage, la puissance émise en FM est indépendante du signal à transmettre.

Inconvénient de la FM: leurs fréquences étant élevées, les ondes FM diffractent peu, ce qui limite la portée des émetteurs de radiodiffusion. Cette diffraction n'est pas pour autant négligeable, et elle peut provoquer des brouillages. Tout est donc affaire de choix: une même bande de 75 kilohertz pourra servir à une émission radio FM de haute-fidélité ou à 20 conversations en mode BLU.

Les étiquettes électroniques

Détecter à distance un objet ou les victimes d'une avalanche, c'est ce que permettent les étiquettes à identification par radiofréquences. Ces dispositifs exploitent des lois classiques de l'électromagnétisme.



Les membres huppés du *Baja Beach Club* de Barcelone n'ont pas besoin de montrer patte blanche (ou plutôt carte bleue) à l'entrée : une micropuce électronique de la taille d'un grain de riz, insérée sous la peau, permet de les identifier. Cette nouvelle pratique digne de la science-fiction illustre bien l'essor actuel des étiquettes à identification par radiofréquences (ou encore RFID pour *radio-frequency identification*). Certes, ces dispositifs doivent leur développement à la miniaturisation des composants électroniques, mais leur polyvalence et leur fonctionnement reposent sur quelques lois de l'électromagnétisme.

Nous tenons tous à notre intimité, mais il est des situations où l'on souhaite vivement être repéré et identifié à distance. Par exemple en attendant les secours après avoir été emporté par une avalanche. Mieux vaut alors s'être muni d'un ARVA, acronyme d'*appareil de recherche de victime d'avalanche*. Cette balise émet et détecte un signal électromagnétique à 457 kilohertz, dans le domaine des radiofréquences. Lorsque chaque membre d'un groupe de skieurs en est équipé, les recherches effectuées par ceux qui auraient échappé à l'avalanche ou par les équipes de secours sont grandement facilitées.

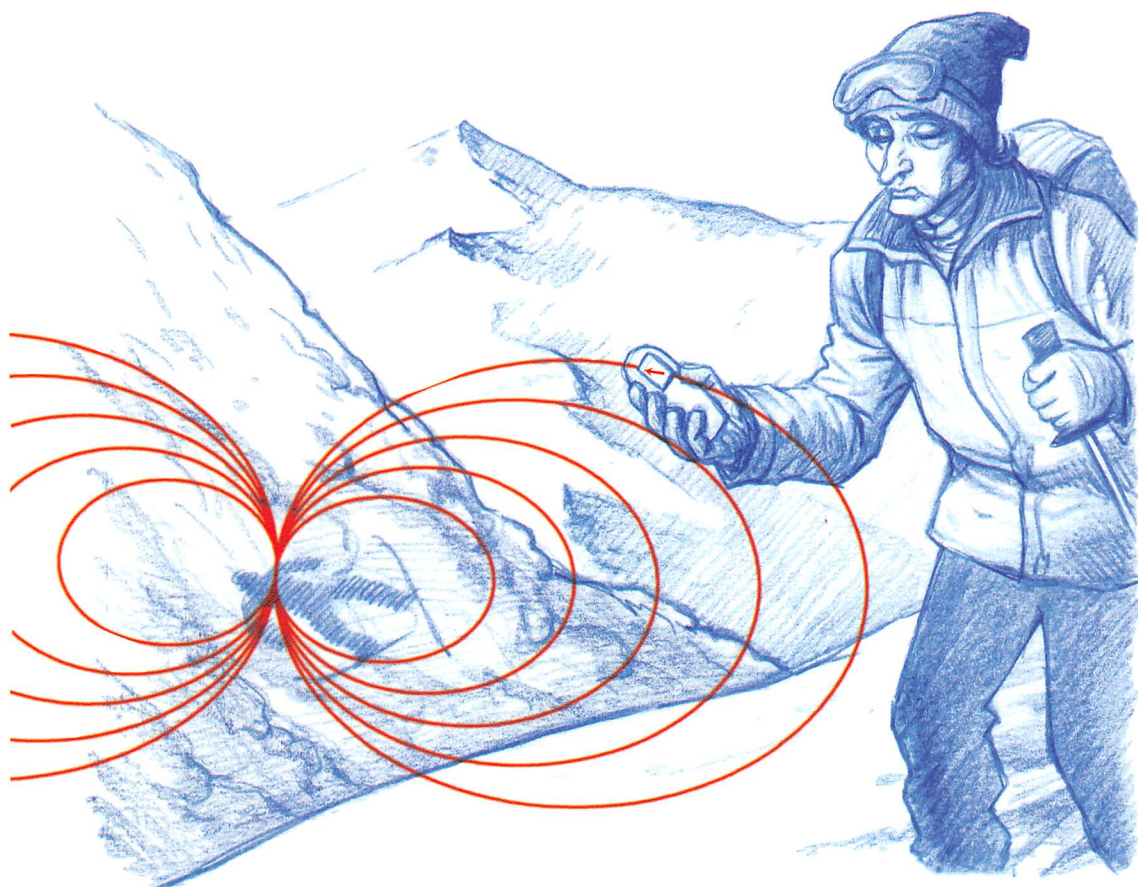
L'utilisation de l'ARVA est toutefois délicate. Les caractéristiques du rayonnement sont telles que sa portée ne dépasse pas quelques dizaines de mètres, soit beaucoup moins que la longueur d'onde du rayonnement (656 mètres). Dans ces conditions, le détecteur se trouve dans la zone dite de champ proche, où le champ électromagnétique créé par l'émetteur est, pour l'essentiel, un champ magnétique semblable à celui d'un aimant dont la polarité change périodiquement. Les lignes de champ forment des boucles autour de l'antenne émettrice

(voir la figure 1): la direction du champ, indiquée par l'ARVA, suit ces boucles et ne pointe donc pas directement vers la victime.

C'est pourquoi la localisation d'une victime à l'aide d'un ARVA exige de l'expérience. En outre, chaque ARVA doit avoir sa propre source d'alimentation, c'est-à-dire une batterie. Aussi, malgré les progrès techniques, l'appareil demeure assez encombrant (il pèse quelque 300 grammes) et nécessite un entretien.

Des balises sans alimentation

Et si l'on réservait la détection aux seules équipes de secours? Il est alors possible de réaliser des balises sans batteries, bien plus légères et moins coûteuses, qui fonctionnent en prélevant leur énergie dans... le rayonnement émis par le dispositif de détection des secouristes. Le principe est celui des étiquettes antivol utilisées pour protéger livres et disques dans les magasins (voir la figure 2). Au sein du portique du magasin



1 Un émetteur-détecteur ARVA équipant un skieur emporté par une avalanche crée un champ magnétique alternatif (lignes de champ en rouge), dont la portée est

de quelques dizaines de mètres. Un autre appareil ARVA détecte ce champ. La direction de ce champ ne pointe pas directement vers la victime, mais elle aide à la localiser.

sont dissimulées des bobines qui engendrent un champ magnétique alternatif, à une fréquence de quelques mégahertz. L'étiquette, plaquette de quelques centimètres carrés, comporte un ruban conducteur en spirale. Comme l'a découvert Michael Faraday en 1831, les variations du champ magnétique induisent un courant électrique alternatif dans ce circuit élémentaire. Ainsi, tout comme dans un transformateur électrique, le primaire (le portique) assure l'alimentation du secondaire (l'étiquette).

L'étiquette prélève par conséquent de l'énergie électrique au portique, et c'est ainsi que l'étiquette est détectée. Mais comment distinguer celle-ci des clefs, montres ou bijoux – conducteurs électriques qui se comportent de façon similaire ? À cet effet, on associe au circuit de l'étiquette un condensateur. Cela forme un circuit électrique oscillant, qui entre en résonance lorsqu'il est excité à la bonne fréquence. Il suffit alors de balayer la fréquence du champ magnétique du portique autour de la fréquence de résonance de l'oscillateur : tandis que les perturbations parasites ne dépendent pas ou peu de la fréquence excitatrice, l'étiquette se manifeste uniquement à la fréquence de résonance, en laissant une signature électrique claire dans le courant du portique.

Pour une identification encore plus sélective, on peut aussi inclure dans l'étiquette une puce électronique portant des données numériques. L'énergie nécessaire au fonctionnement de la puce provient du courant électrique induit dans le circuit de l'étiquette, tandis que la puce, en modulant le courant de ce circuit, permet de transmettre des informations au détecteur. Le passe *Navigo* utilisé dans les transports publics franciliens fonctionne selon ce principe, à une fréquence de 13,56 mégahertz : il identifie l'abonnement de l'usager et valide son trajet.



2 Une étiquette antivol comporte un petit circuit dépourvu d'alimentation électrique. Lorsqu'elle passe dans un champ magnétique alternatif (lignes rouges) créé par un bobinage interne aux portiques (en noir), un courant y est induit. L'énergie ainsi prélevée aux portiques modifie le courant qui y circule, et c'est cette modification que l'on détecte.

Téledétection à haute fréquence

Pour identifier des objets à plus longue distance et transmettre davantage d'information, des fréquences plus élevées sont nécessaires. À quelques gigahertz, la longueur d'onde est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Dans ces conditions, quand la distance à l'antenne émettrice dépasse le mètre, le champ émis est plutôt une onde électromagnétique dont l'amplitude décroît comme l'inverse de la distance. Cette décroissance, beaucoup plus lente qu'à basse fréquence (où la décroissance est comme l'inverse du cube de la distance), laisse espérer une portée supérieure. Malheureusement, dans ce régime, le champ émis par l'antenne est une onde qui se propage librement ; son éventuelle absorption par l'étiquette ne se traduit par aucun effet sur l'antenne, contrairement au cas des portiques antivol.



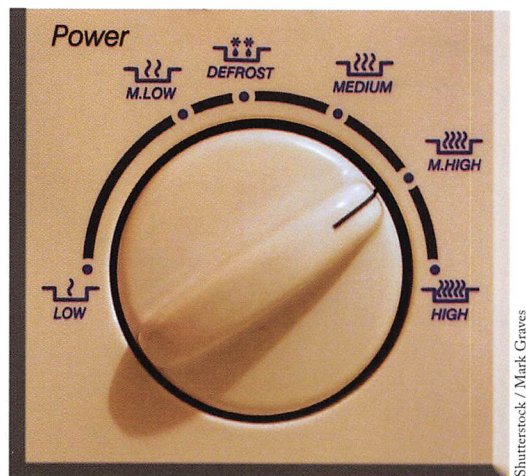
3 Dans le dispositif RECCO, seul le secouriste a un émetteur doté d'une source d'alimentation. Le skieur n'a qu'un circuit passif, de petite taille, qui entre en résonance lorsqu'il reçoit des ondes de l'émetteur (en orange). Cette étiquette électronique émet alors un

rayonnement (en bleu). Grâce à la diode intégrée au circuit, l'une des principales composantes du rayonnement renvoyé est de fréquence double $2f$ par rapport à la fréquence excitatrice f . Cette différence de fréquences facilite la détection.

Il faut par conséquent se résoudre à détecter le champ rayonné par l'étiquette. La difficulté, c'est qu'il est beaucoup plus faible que le champ excitateur. D'où une dernière astuce : insérer une diode dans le circuit électrique de l'étiquette (voir la figure 3). Celle-ci redresse le courant, autrement dit supprime les alternances négatives du courant alternatif. Le champ rayonné par l'étiquette n'est alors plus un signal sinusoïdal oscillant à la fréquence d'émission, mais un signal dont l'une des principales composantes est de fréquence double. Cette composante, bien distincte de la fréquence excitatrice, est facile à détecter.

C'est ainsi que fonctionne un nouveau système de détection des victimes d'avalanche, le dispositif RECCO. L'étiquette électronique, excitée à une fréquence de 0,917 gigahertz, renvoie un signal à 1,834 gigahertz. Étant entièrement passive (sans batterie interne), elle est très petite et peut facilement être intégrée dans les équipements du skieur, vêtements compris. En revanche, l'ensemble excitateur/détecteur, qui doit être suffisamment puissant et sensible, est plus encombrant (quelque 1,6 kilogramme) qu'une balise ARVA et est réservé aux équipes de secours. De nombreuses stations en sont équipées. Ce qui n'empêche pas les professionnels de la montagne de recommander l'utilisation conjointe d'ARVA et de RECCO, pour une meilleure sécurité.

À la chaleur des micro-ondes



Les micro-ondes permettent de réchauffer, voire de cuire des aliments. Oui, mais pas n'importe quelles micro-ondes, et pas n'importe comment.

Qui n'a pas réchauffé ou cuit un aliment dans un four à micro-ondes ? Ce mode de chauffage est devenu banal, et parfois surexploité par les restaurateurs. Mais il n'est pas certain que Monsieur Tout-le-monde en connaisse bien le principe. Dommage ! Cela lui permettrait de savoir, par exemple, s'il faut ou non placer son bol au centre du plateau tournant...

Pour chauffer un aliment, il faut lui céder de l'énergie. Le procédé le plus immédiat est de mettre en contact le matériau avec une source de chaleur à température plus élevée (des flammes ou le fond de la poêle !) et de laisser la chaleur se propager depuis la surface de contact jusqu'au cœur de l'aliment. Mais le chauffage qui en résulte est inégal et relativement lent.

Un procédé plus subtil ? Utiliser des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire un champ électrique et un champ magnétique qui oscillent de conserve tout en se propageant. Ces ondes, qu'il s'agisse d'ondes radio, de lumière visible ou invisible comme les infrarouges et les ultraviolets, transportent de l'énergie. Et lorsque la matière les absorbe, elle encaisse du même coup leur énergie, qui se transforme en chaleur.

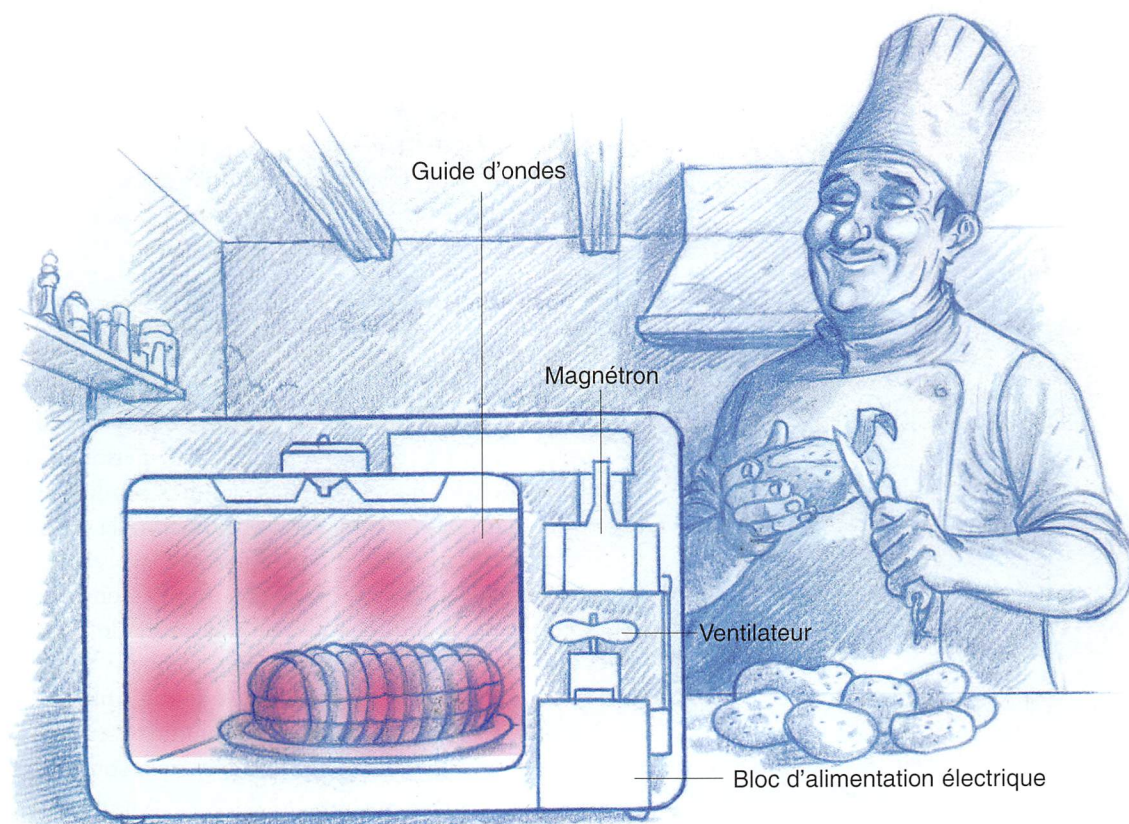
Le transfert d'énergie dépend à la fois de la nature du matériau et de la longueur d'onde du rayonnement utilisé, ou encore de sa fréquence (le quotient de la vitesse de la lumière par la longueur d'onde). Pour la cuisson des aliments, composés à 90 pour cent d'eau, il faut considérer l'interaction des ondes électromagnétiques avec ce liquide. Or on constate que le coefficient d'absorption de l'eau, à part une courte fenêtre correspondant à la lumière visible où il s'effondre (l'eau nous apparaît bien transparente), croît avec la fréquence.

Quelle fréquence choisir ? Si l'onde est très bien absorbée, elle ne pénètre que sur une mince couche de l'aliment, en surface, et la poursuite de la cuisson s'effectue par

conduction thermique. C'est le principe du grill, où la cuisson est assurée par les ondes infrarouges émises par une résistance. Au contraire, si l'absorption est faible, le rayonnement pénètre en profondeur, mais il ne cède pas beaucoup d'énergie. C'est le cas des ondes radio. Pour avoir un chauffage efficace dans ce domaine de fréquences, il faudrait des puissances très importantes. Cela impliquerait une amplitude élevée de l'onde et de son champ électrique, à l'origine de claquages électriques (étincelles ou éclairs).

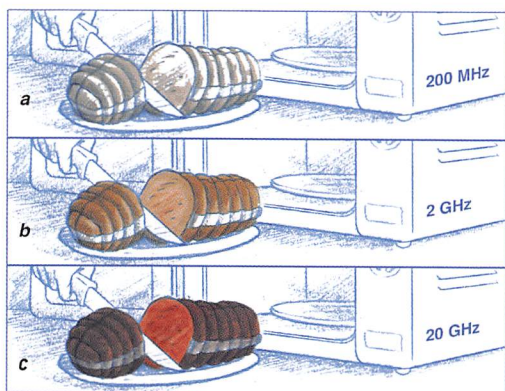
Choisir les bonnes ondes

Le meilleur compromis, entre ondes radio et infrarouges, correspond à des fréquences de l'ordre du gigahertz, soit une longueur d'onde de quelques dizaines de centimètres, comparable à la taille des aliments à cuire. En 1947, l'autorité américaine d'attribution des fréquences avait alloué, pour les applications industrielles, médicales et scientifiques des micro-ondes, les fréquences 0,915 et 2,45 gigahertz. En France, les fours utilisent la seconde, de longueur d'onde égale à 12,24 centimètres.

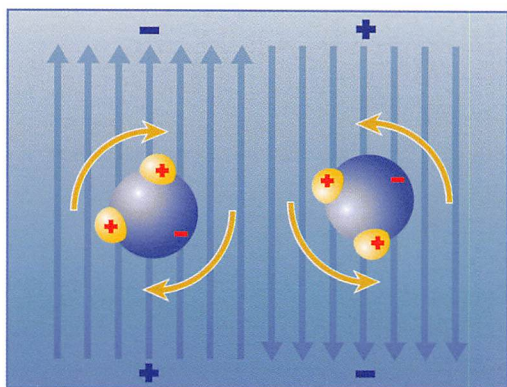


1 L'intensité des micro-ondes à l'intérieur du four n'est pas uniforme: en raison notamment des réflexions sur les parois, l'intensité (*en rose*) se répar-

tit de façon périodique et laisse des endroits peu irradiés. Le plateau tournant pallie l'hétérogénéité du chauffage qui s'ensuit.



2 Plus les micro-ondes ont une fréquence élevée, plus l'eau les absorbe. À 200 mégahertz par exemple, elles pénètrent très bien dans un aliment et le cuisent uniformément, mais très lentement *(a)*. À 20 gigahertz, elles pénètrent très peu en profondeur, et la cuisson est trop violente en surface *(c)*. Une fréquence de 2 gigahertz offre un compromis *(b)* : les ondes pénètrent bien et sont assez bien absorbées, d'où une cuisson plus réussie (mais pas encore idéale pour un rôti de bœuf).



3 Les micro-ondes chauffent l'eau des aliments en faisant pivoter alternativement les molécules d'eau *(flèches orange)*. En effet, la partie négativement chargée de la molécule est attirée par le champ électrique positif *(flèches bleues)*, et sa partie positive est repoussée. Comme le champ électrique de la micro-onde change de sens à la fréquence de l'onde, la molécule change aussi de sens de rotation à cette fréquence. Par « frottement » avec les molécules voisines, l'énergie de ces rotations se transforme en chaleur.

Comment les micro-ondes interagissent-elles avec l'eau ? La molécule d'eau (un atome d'oxygène et deux d'hydrogène) est polaire, c'est-à-dire que ses charges électriques sont inégalement réparties : l'oxygène tire à lui le nuage d'électrons qu'il partage avec les atomes d'hydrogène. Il en résulte un excès de charges négatives sur l'oxygène, compensé par des charges positives sur les atomes d'hydrogène.

Soumise à un champ électrique uniforme et constant, une molécule d'eau isolée pivote pour aligner son axe de symétrie dans la direction du champ. En phase liquide et avec un champ oscillant, la molécule doit sans cesse se réaligner avec le champ alors qu'elle interagit, par l'intermédiaire de collisions ou de « liaisons hydrogène », avec ses voisines. Ces dernières agissent en moyenne comme une force de frottement qui empêche la molécule de tourner avec le champ, force d'autant plus intense que la rotation est rapide. Ce frottement moléculaire dissipe l'énergie en chaleur.

Lorsque la rotation des molécules d'eau est entravée, cas de la glace où l'orientation d'une molécule est fixée par les liaisons hydrogène avec ses voisines, le chauffage par micro-ondes est beaucoup moins efficace. C'est pourquoi la décongélation est bien plus longue que la cuisson.

La glace chauffe moins que l'eau

Le cuisinier y remédie en réglant son four à faible puissance. Le four émet alors par périodes des micro-ondes qui chauffent l'eau déjà fondue, alors que dans les périodes sans émission, la chaleur diffuse et fait fondre un peu plus de glace. *A contrario*, la présence de sel facilite la montée en température de l'eau : les ions, de chlore et de sodium pour le sel de cuisine, vont et viennent selon la direction du champ, ce qui crée de multiples collisions favorables au transfert d'énergie thermique.

Notons que le mécanisme physique sous-jacent ne correspond à aucune transformation moléculaire, l'énergie transportée par l'onde étant beaucoup plus faible que celle des liaisons chimiques. *A priori*, avec des micro-ondes, il n'y a donc pas dégradation des aliments autre que par effet thermique.

En pratique, les micro-ondes sont produites par un appareil dénommé magnétron et injectées dans la cavité formée par l'intérieur du four. Les parois de la cavité sont en métal (une grille métallique au niveau de la porte), qui réfléchit très efficacement les micro-ondes et les confine : seuls quelques dizaines de milliwatts s'échappent effectivement, pour une puissance initiale de 800 watts. Cet écran suffit à nous protéger, mais il laisse passer assez d'ondes pour qu'un téléphone portable, appareil qui fonctionne à des fréquences proches, placé à l'intérieur et porte fermée (le four éteint!), sonne s'il est appelé.

La réflexion sur les parois métalliques a une autre conséquence : l'intérieur est une cavité résonnante, qui n'est excitée efficacement que par certaines fréquences. C'est l'analogie, en trois dimensions, de la résonance d'une corde tendue que l'on fait vibrer par l'une de ses extrémités (la longueur de la corde est alors un multiple entier de la demi-longueur d'onde).

Pour un four commun mesurant $19 \times 29 \times 29$ centimètres cubes, on trouve des résonances à des longueurs d'onde de 12,274 et 12,277 centimètres, très proches de la longueur d'onde du four (12,24 centimètres). Dans ces conditions, la cavité est le siège d'une onde stationnaire, dont l'amplitude varie comme sur une corde : il y a des endroits où elle est presque nulle et d'autres maximale.

La cuisson des aliments et la température n'y sont donc pas homogènes ! On a ainsi relevé plus de 20 degrés d'écart au sein d'un biberon d'eau chauffée. D'où l'intérêt du plateau tournant : les aliments, déplacés, sont soumis à des champs d'amplitudes variées et chauffent de façon plus homogène. Par conséquent, pour chauffer un petit plat ou un biberon, mieux vaut ne pas le placer au centre, où il serait immobile et la rotation du plateau inutile. Ce qui ne dispense pas d'agiter ou de mélanger tout aliment cuit aux micro-ondes, afin d'éviter la pénible alternance en bouche de l'à peine tiède et du brûlant.



Shutterstock / Erik Chandler

Des lignes de courant continu ou alternatif?

Le courant alternatif est plus facile à produire, à transformer et à utiliser. Mais pour le transporter, c'est une autre histoire...

D'un geste anodin et routinier, vous appuyez sur un interrupteur et tout s'éclaire. Mais vous avez rarement conscience que l'énergie électrique qui allume votre lampe a été produite à plusieurs dizaines, centaines ou milliers de kilomètres de distance – et facilement acheminée par des lignes aériennes, souterraines ou sous-marines.

Le plus souvent, les lignes sont à haute tension et à courant alternatif. Pourquoi une haute tension? Pour limiter les pertes, comme nous le verrons. Et pourquoi du courant alternatif et non du courant continu? Cette prédominance est avant tout la conséquence d'une guerre industrielle livrée à la fin du XIX^e siècle aux États-Unis entre les compagnies de Thomas Edison et de George Westinghouse. À l'époque, le courant alternatif promu par Westinghouse était techniquement plus mûr et triompha. Aujourd'hui, des considérations environnementales et économiques relancent le courant continu.

Hautes tensions pour moins de pertes

Voyons d'abord pourquoi l'utilisation de hautes tensions réduit les pertes d'énergie dans le transport de l'électricité. Lorsqu'un courant électrique circule dans un câble, celui-ci s'échauffe : une partie de l'énergie électrique est dissipée par « effet Joule », dû à la résistance qu'oppose la matière au mouvement des charges électriques. Cette dissipation croît comme le carré de l'intensité du courant. Or la puissance électrique transportée est égale au produit de la tension entre les câbles par l'intensité du courant. Par conséquent,

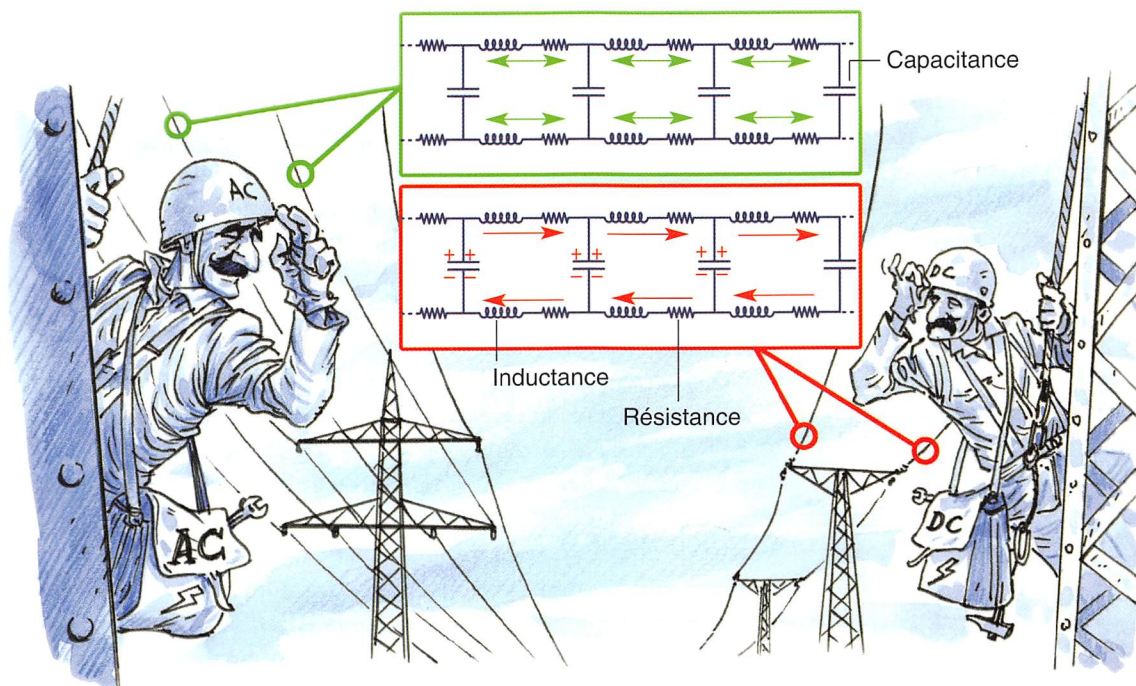
à puissance constante, on peut augmenter la tension tout en abaissant l'intensité du courant électrique, ce qui diminue la dissipation d'énergie. Pour transporter une puissance électrique de l'ordre de deux gigawatts – la production de deux cœurs de centrale électronucléaire –, on utilise ainsi couramment des tensions et intensités atteignant 735 kilovolts et 3 000 ampères.

Mais les hautes tensions ne sont adaptées ni à la production de l'électricité ni, surtout, à sa consommation. Elles nécessitent ainsi des dispositifs capables de les convertir en basses tensions (telle la tension domestique de 220 volts) et inversement. Contrairement au cas du courant continu, il existe pour les tensions alternatives des convertisseurs simples, par exemple le transformateur composé d'un noyau en acier laminé autour duquel sont enroulés deux fils de cuivre : ce système multiplie la tension d'entrée par le rapport des nombres de spires des deux enroulements.

Le retour en grâce du courant continu

La nécessité de convertir les tensions confère donc un avantage au courant alternatif. Qui plus est, la plupart des machines électriques fonctionnent grâce à un champ magnétique tournant, qu'il est facile de créer avec un courant alternatif (triphase).

Toutefois, pour le transport, le courant alternatif a quelques inconvénients, dus au fait que les câbles parallèles qui composent une ligne de transport interagissent électriquement



1 Deux conducteurs proches où circule un courant interagissent électriquement et magnétiquement. Qu'il s'agisse de courant continu (*en rouge*) ou

alternatif (*en vert*), la paire de câbles équivaut à un circuit où se succèdent résistances, inductances et capacités.

et magnétiquement. La différence de tension entre les divers câbles de la ligne provient de la présence de charges électriques situées sur ceux-ci en vis-à-vis. Autrement dit, chaque portion de ligne se comporte comme un condensateur qui stocke des charges et de l'énergie électrostatique. Cet effet capacitif est faible dans les lignes aériennes, où les câbles sont relativement espacés. Il est en revanche particulièrement marqué dans les lignes souterraines ou sous-marines, où les câbles sont groupés.

Le courant qui circule dans chaque câble crée par ailleurs un champ magnétique. Si le courant varie, il en est de même pour le champ magnétique, et cette variation induit un courant supplémentaire dans les câbles voisins : c'est l'effet d'inductance mutuelle, qui est prédominant dans les lignes aériennes.

Pour les lignes à courant continu, une fois le courant établi, les câbles sont chargés une fois pour toutes et le champ magnétique, constant, n'induit aucun courant : l'énergie électrique et l'énergie magnétique stockées dans le câble restent constantes.

Un courant selon la distance

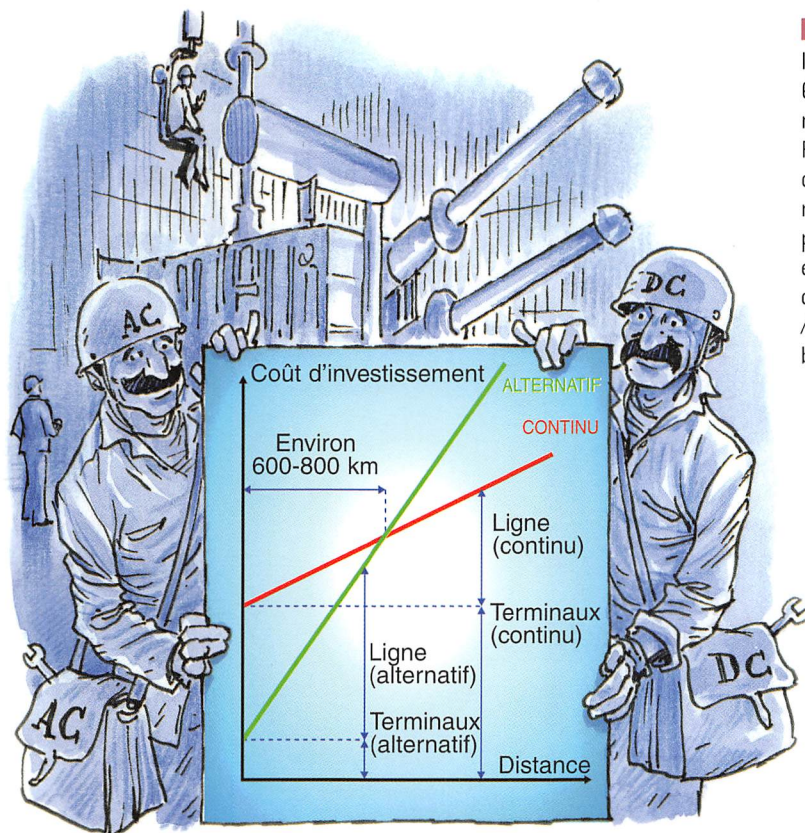
Ce n'est pas le cas pour un courant alternatif. Même si aucun appareil ne consomme de la puissance à l'autre bout de la ligne, le générateur d'électricité charge et décharge périodiquement le câble, d'où des pertes par effet Joule. De plus, le générateur doit alternativement céder de l'énergie à la ligne durant la moitié du temps, puis la récupérer durant l'autre moitié du temps. Pour les lignes aériennes, où les effets sont principalement inductifs, on peut placer périodiquement de gros condensateurs qui échangent leur énergie avec les câbles et soulagent ainsi les générateurs. En revanche, pour les câbles sous-marins, où les effets sont surtout capacitifs, il faudrait des impédances de compensation dont les tailles seraient déraisonnables.

Le courant continu n'a pas ces inconvénients, et lui seul peut transporter la puissance électrique en sous-sol sur de longues distances. Ainsi, le câble sous-marin IFA2000 transporte deux gigawatts sur 78 kilomètres entre la France et la Grande-Bretagne. Pour les lignes aériennes aussi, le continu a ses avantages : une ligne à courant continu est en général constituée de deux câbles soumis à des tensions opposées, tandis qu'une ligne à courant triphasé nécessite quatre câbles (avec un câble neutre), voire cinq (avec un câble de mise à la terre). La construction d'une ligne à courant continu exige donc moins de cuivre et des pylônes moins larges : elle est moins onéreuse.

Comme le coût des convertisseurs alternatif-continu demeure important, le transport en courant continu ne devient avantageux qu'au-delà de 600 kilomètres environ. C'est le cas de la ligne aérienne *Cahora Bassa* entre le Mozambique et l'Afrique du Sud, qui achemine une puissance de 1,9 gigawatt sur 1 420 kilomètres. Notons qu'on utilise aussi le courant continu pour transférer la puissance électrique entre réseaux alternatifs qui ne sont pas synchronisés, comme le sont les réseaux de diverses régions d'Europe ou des États-Unis.

Le choix semble donc clair : courant continu pour de grandes distances de transport, courant alternatif pour les courtes distances. Mais c'est sans compter sur les goulots d'étranglement, zones du réseau électrique où doivent circuler des puissances considérables. Par exemple, pour alimenter des zones urbaines très denses, qu'il s'agisse de courant continu ou alternatif, les solutions classiques restent encombrantes et sources de perturbations.

2 Le transport de l'électricité à longue distance, au-delà d'environ 600-800 kilomètres, se révèle moins coûteux en courant continu. Pour des distances plus courtes, le courant alternatif est favorisé, en raison du coût supérieur des équipements nécessaires aux deux extrémités d'une ligne à courant continu (convertisseurs continu / alternatif, transformateurs en basse tension, etc.).



Pour ces situations particulières, on commence à faire appel aux matériaux supraconducteurs à haute température découverts dès 1987. Jusqu'à récemment, la supraconductivité, c'est-à-dire la conduction d'un courant électrique sans aucune résistance, donc sans pertes, était réservée à des applications très spécifiques: elle exigeait un refroidissement à l'hélium liquide, à des températures proches du zéro absolu ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Or les nouveaux supraconducteurs conservent leur propriété jusqu'à la température de l'azote liquide ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), fluide beaucoup moins cher et plus facile à obtenir que l'hélium liquide.

Pour un encombrement inférieur, une ligne supraconductrice peut transporter près de cinq fois plus de puissance qu'une ligne classique. Une telle ligne, à 138 kilovolts, a été réalisée par la compagnie américaine *Nexans*. Longue de 600 mètres, elle vient d'être mise en service à Long Island, dans l'État de New York (États-Unis) et intégrée au réseau de distribution. À plein régime, elle devrait transporter 574 mégawatts, de quoi alimenter 300 000 foyers.



Un peu de culture physique



Golf, marche, football,
course, voile, rugby...

Chaque sport a ses secrets.



Shutterstock / Monkey Business Images

Marcher comme un athlète

Pour se déplacer sans véhicule, l'homme a deux possibilités : la marche et la course. La première n'est pas forcément plus lente que la seconde.

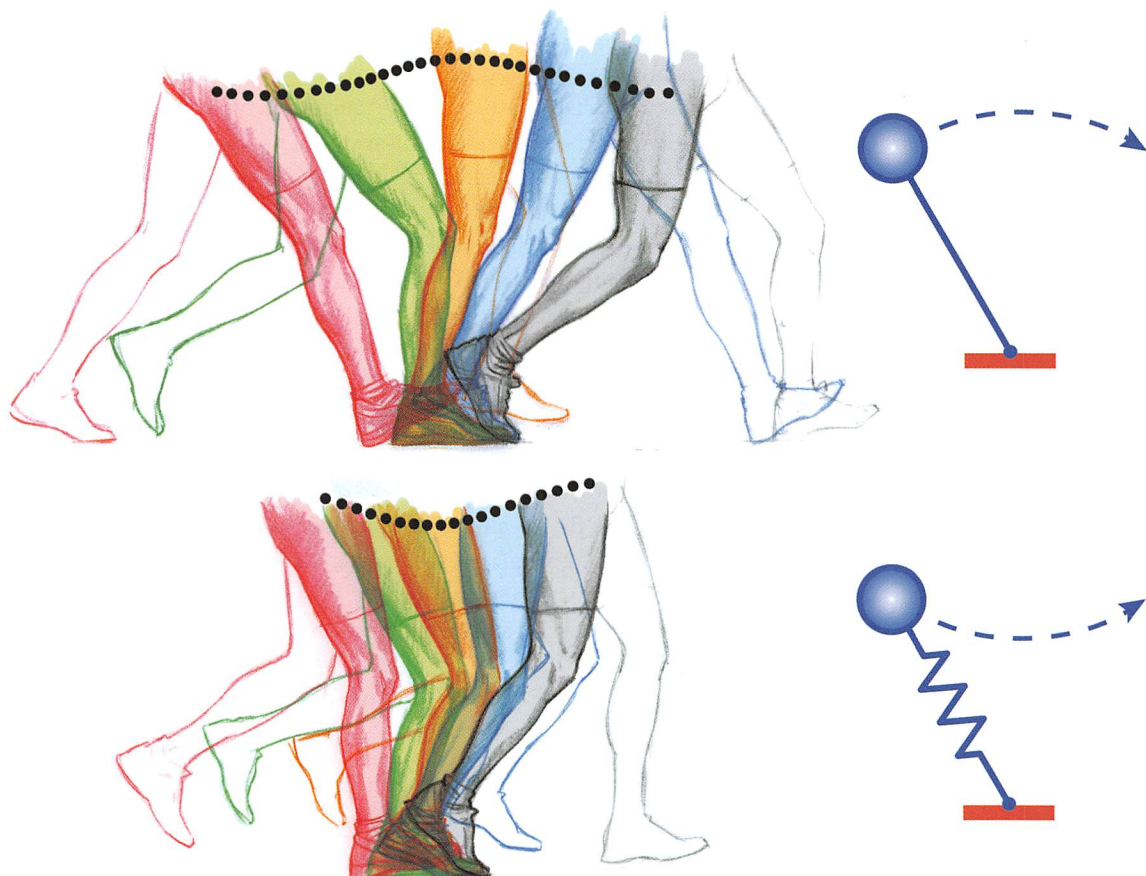
Pour le néophyte, l'allure des marcheurs de compétition est singulière. Plus étonnante encore est son efficacité. Ainsi, le record de France sur 50 kilomètres, détenu par le champion Yohann Diniz, est de 3 heures 41 minutes et 39 secondes, soit une moyenne de 13,5 kilomètres par heure, alors que nous nous mettons spontanément à courir dès que notre vitesse dépasse les six à huit kilomètres par heure. Les raisons qui nous font passer de la marche à la course nous feront comprendre pourquoi cette discipline sportive est si codifiée et comment de telles performances sont possibles.

Marcher ou courir : les différences

Première différence entre la marche et la course : lorsque nous marchons, nous avons toujours au moins un pied en contact avec le sol ; de plus, entre deux foulées, nos deux pieds touchent terre simultanément. En revanche, la course se caractérise par une phase de suspension en l'air, sans appui. La première règle de la marche athlétique est donc évidente : le marcheur doit constamment avoir un appui au sol.

Une deuxième caractéristique de la marche est que la jambe d'appui est tendue. En gros, cette jambe se comporte comme un pendule inversé, c'est-à-dire comme une barre rigide dirigée vers le haut effectuant sous l'effet de la gravité une rotation autour de son extrémité en contact avec le sol (*voir la figure 1*).

Afin d'amorcer le mouvement, nous nous déséquilibrons vers l'avant. Quand le pied est en appui, la jambe pivote autour de la cheville et, au moment où elle bascule, nous avançons notre seconde jambe, qui prend le relais, et ainsi de suite. Notons que, pendant que la jambe se redresse, la vitesse du déplacement diminue et le centre de gravité du corps s'élève ; ce centre de gravité atteint sa hauteur maximale lorsque la jambe est verticale.



1 **Lorsqu'on marche** (*en haut*), la hauteur du centre de gravité du corps est maximale quand la jambe est verticale; le mouvement de la jambe ressemble à celui d'un pendule inversé (*en haut à droite*). Au contraire, lorsqu'on

court (*en bas*), le centre de gravité est au plus bas quand la jambe est à peu près verticale; le mouvement ressemble à celui d'un pendule inversé avec une tige élastique (*à ressort*).

La course, elle, met en jeu une flexion de la jambe d'appui. Cette jambe se comporte comme un ressort qui se comprime lors des phases d'appui: le centre de gravité du corps est donc au plus haut durant la phase de suspension et au plus bas lorsqu'il passe au-dessus du pied, quand la jambe est fléchie au maximum. Un critère précis permet donc de distinguer marche et course: la position du centre de gravité lorsqu'il est à la verticale du point d'appui. S'il est à sa hauteur maximale, c'est de la marche; dans le cas contraire, il s'agit de course.

On saisit donc la raison d'une deuxième règle de la marche sportive: le marcheur doit bien tendre sa jambe à partir du moment où le talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité passe au-dessus du pied. Avec cette règle, on évite la fameuse «course en marchant» de Groucho Marx (*voir la figure 2*). En gardant les jambes très fléchies, il est en effet possible de courir, c'est-à-dire de profiter de l'élasticité des jambes, en conservant ses appuis au sol. Cette marche cinématographiquement inoubliable n'a pas cours dans les stades, mais a le mérite de rendre compte du mode de locomotion rapide des éléphants: ils courent, bien qu'ils ne décollent pas du sol!

Pourquoi, passée une certaine vitesse, préférons-nous courir? De même, pourquoi un quadrupède comme le cheval passe-t-il du pas au trot, puis au galop (*voir la figure 3*)? Le

premier avantage de la transition est énergétique. En principe, l'énergie nécessaire pour se déplacer sur un sol horizontal est très faible puisqu'il s'agit surtout de vaincre les frottements avec l'air. Les cyclistes qui se mettent en roue libre le savent bien. Mais en pratique, nous n'avons pas de roue et nous avançons en effectuant de subtils transferts entre différentes formes d'énergie.

Pour la marche, lorsque notre centre de gravité passe au-dessus du pied, la vitesse et l'énergie cinétique du corps sont minimales et l'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de gravitation. Pour la course, nous profitons de l'énergie élastique des tendons et des muscles. La restitution et la dépense d'énergie sont cependant loin d'être idéales : outre les aspects physiologiques, la pose du pied au sol freine la jambe et dissipe son énergie cinétique, et il faut à chaque foulée ramener la seconde jambe vers l'avant.

Les mesures montrent que, pour parcourir une distance donnée, la marche est énergétiquement plus économique que la course aux petites vitesses, et que c'est l'inverse aux vitesses supérieures. En outre, pour chacune de ces allures, il existe une vitesse optimale, avec une dépense énergétique minimale. Et plutôt que de se déplacer toujours à la même vitesse, il est préférable d'alterner marches et courses, comme les fantassins du Moyen Âge qui accompagnaient leurs seigneurs à cheval : ils ajustaient leur vitesse moyenne en jouant sur les durées respectives de ces deux allures.

Passer de la marche à la course

Ce résultat permet de comprendre nos choix sur une longue distance, mais, pour élucider la transition marche-course, il faut étudier les forces. Le mouvement de la jambe d'appui en pendule inversé est une rotation, au cours de laquelle notre corps subit une force centrifuge dirigée le long de la jambe. Cette force est d'autant plus grande que la vitesse augmente, et



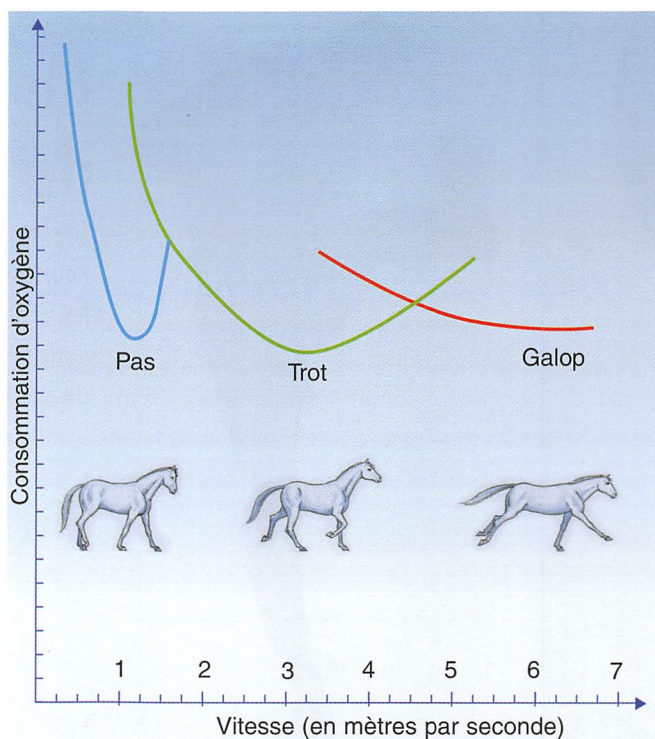
2 Un marcheur sportif doit maintenir sa jambe tendue à partir du moment où son talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité du corps passe au-dessus du pied. Il ne peut profiter de l'élasticité des muscles, comme le faisait au cinéma Groucho Marx en marchant à vive allure les jambes fléchies – une sorte de marche-course qui a son analogue chez les éléphants.

elle s'oppose au poids lorsque la jambe est verticale. Aussi, quand ces deux forces sont égales, il n'y a plus d'appui possible au sol – donc plus de marche.

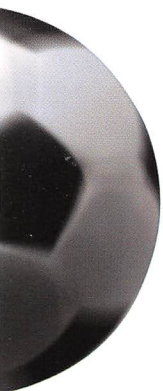
Le rapport entre la force centrifuge et le poids, nommé nombre de Froude, est égal au carré de la vitesse divisé par le produit de la longueur des jambes et de l'accélération de la pesanteur. L'égalité des forces est obtenue lorsque ce nombre est égal à un. Pour un adulte dont les jambes mesurent un mètre, cela correspond à une vitesse de l'ordre de trois mètres par seconde, c'est-à-dire dix kilomètres par heure.

En réalité, la transition marche-course a lieu pour des nombres de Froude inférieurs, de l'ordre de 0,5 (environ deux mètres par seconde). Pourquoi? À mesure que la vitesse croît, la composante verticale de la force d'appui subit des variations de plus en plus importantes, la force centrifuge étant augmentée en milieu de foulée. L'élasticité des muscles et des tendons de la jambe est alors de plus en plus sollicitée. Au-delà d'une certaine contrainte, il devient plus confortable de passer d'un mode rigide à un mode élastique et notre corps passe spontanément de la marche à la course.

La marche athlétique permet pourtant d'atteindre, sur de courtes distances, des vitesses de 17 kilomètres par heure, soit des nombres de Froude bien au-delà de un! Ici, l'effet de la force centrifuge est diminué grâce au mouvement des bras du marcheur; on limite ainsi l'amplitude des oscillations du centre de gravité afin de ne pas décoller. Ce sont ensuite les articulations qui sont mises à profit pour amortir les chocs; une fois le pied posé, la pointe du pied relevée, on déroule la cheville. Enfin, des mouvements de rotation du bassin, caractéristiques, permettent d'allonger la foulée. Toute cette impressionnante technique ne doit cependant pas faire oublier au marcheur la règle d'or: c'est la gravité qui assure la propulsion et sa chute continue qui le fait avancer.



3 À une vitesse de déplacement donnée correspond en général un mode de locomotion optimal du point de vue énergétique, comme le montrent les trois courbes de consommation d'oxygène (par unité de distance parcourue) relatives au pas, au trot et au galop d'un cheval. De même, l'homme a intérêt à marcher aux petites vitesses, mais à courir dès que la vitesse doit dépasser environ six kilomètres par heure.



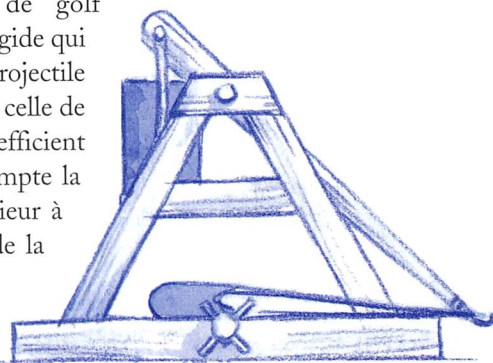
Le trébuchet du footballeur

Pour transférer efficacement de l'énergie, les artilleurs du Moyen Âge utilisaient sans le savoir un pendule double. Tout comme, de nos jours, les footballeurs et les golfeurs.

Les footballeurs professionnels communiquent au ballon une vitesse pouvant aller jusqu'à 120 ou 130 kilomètres par heure. Pour réaliser cet exploit, ils effectuent un mouvement bien spécifique, où tout l'effort est exercé au niveau de la cuisse et bien avant la frappe. Quand le pied entre en contact avec le ballon, la jambe est tendue et ses muscles pratiquement relâchés. Le mécanisme mis en jeu dans la frappe permet de transférer efficacement l'énergie musculaire au ballon. On le retrouve dans de nombreux dispositifs techniques, par exemple les trébuchets moyen-âgeux (*voir la figure 1*).

Qu'il s'agisse de football ou de golf, l'un des objectifs du sportif est, d'un seul geste et au moyen de sa seule force musculaire, de communiquer la plus grande vitesse initiale au ballon ou à la balle. Dans ces deux sports, le ballon de football (400 grammes) ou la balle de golf (45 grammes) sont plus légers que la partie rigide qui les frappe (pied ou tête de club). Le projectile acquiert à la suite du choc une vitesse égale à celle de l'objet qui le frappe multipliée par un coefficient numérique. Ce coefficient, qui prend en compte la nature molle du choc, est légèrement supérieur à un; le rapport des masses du projectile et de la partie qui frappe n'intervient pas beaucoup.

Il importe donc peu que ce soit le pied, ou l'ensemble pied-mollet, ou



l'ensemble pied-mollet-cuisse, qui soit en mouvement au moment du choc. Il faut en revanche une vitesse maximale. Pour ce faire, les footballeurs comme les golfeurs utilisent un dispositif mécanique des plus efficaces : une succession de deux bras articulés (os des membres et éventuellement club ou raquette) qui tournent librement l'un par rapport à l'autre.

Observons un coup franc. La jambe du tireur est repliée, le pied nettement ramené vers l'arrière. Au cours du mouvement, la cuisse tourne autour de la hanche. La jambe se déplie en fin de mouvement de sorte qu'au moment de l'impact avec le ballon, elle est presque droite (*voir la figure 2*). Il en est de même pour le swing du golfeur : bras et club sont bien alignés lors de la frappe de la balle. Ajoutons que lors de la première phase du mouvement, l'angle formé par la cuisse et le mollet, ou le bras et le club, reste fixe.

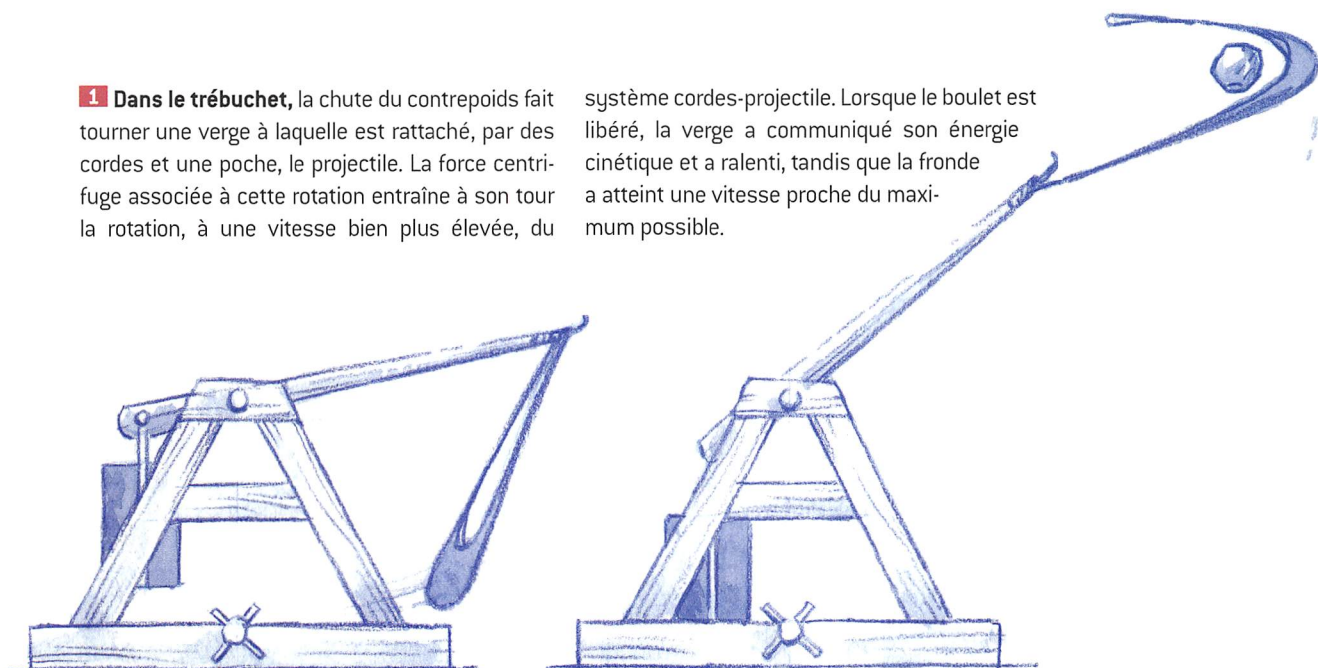
La catapulte, moins efficace que le trébuchet

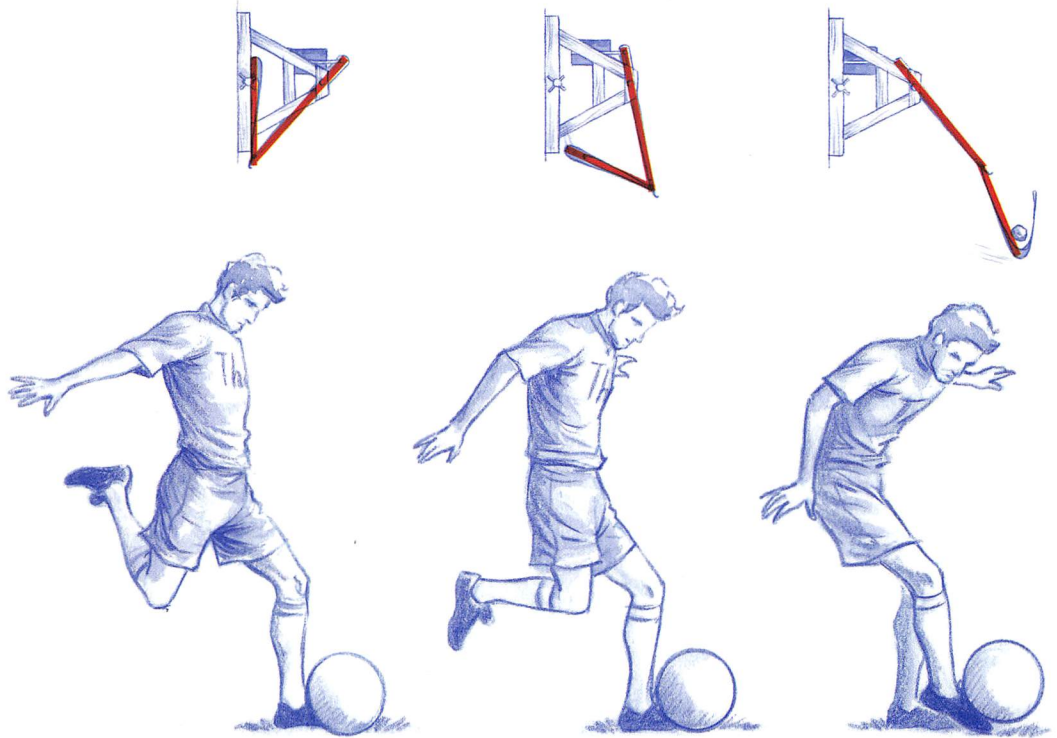
Cette technique est-elle optimale ? Il est inutile de garder la jambe tendue durant tout le mouvement, puisque seule compte *in fine* la vitesse du pied. Accélérer toute la jambe serait un gaspillage d'énergie. On peut comparer une jambe tendue à une catapulte. Lorsque celle-ci envoie le boulet, la quasi-totalité de l'énergie fournie se retrouve en fait dans le bras de l'engin sous forme d'énergie cinétique. Seulement cinq à dix pour cent de l'énergie est cédée au projectile.

Pour des performances bien supérieures à celles de la catapulte, il faut se tourner vers le trébuchet, pièce d'artillerie médiévale capable d'envoyer à 200 mètres des boulets de 100 kilogrammes. Cette arme de jet est constituée d'un contrepoids de quelques tonnes qui actionne une verge à laquelle sont accrochées des cordes. Ces dernières tiennent une poche qui contient le projectile. Lorsque le contrepoids, en

1 Dans le trébuchet, la chute du contrepoids fait tourner une verge à laquelle est rattaché, par des cordes et une poche, le projectile. La force centrifuge associée à cette rotation entraîne à son tour la rotation, à une vitesse bien plus élevée, du

système cordes-projectile. Lorsque le boulet est libéré, la verge a communiqué son énergie cinétique et a ralenti, tandis que la fronde a atteint une vitesse proche du maximum possible.





position haute, est lâché, sa chute fait basculer la verge et accélère l'ensemble de l'équipage en bloc. L'articulation entre la verge et la « fronde » étant libre, la force centrifuge qui s'exerce sur le boulet fait tourner la fronde autour de cette articulation. L'ensemble est alors réglé pour libérer le boulet lorsque fronde et verge sont alignées. Grâce à ce système à deux bras, nommé pendule double par le physicien, 60 à 80 pour cent de l'énergie initiale (l'énergie de pesanteur du contrepoids) est cédée au projectile. C'est presque dix fois plus qu'avec une catapulte !

Pourquoi ce dispositif articulé est-il si efficace ? Imaginons que l'on délivre une certaine quantité d'énergie à la première barre, la seconde étant repliée. À cause de la force centrifuge, la seconde barre est accélérée. Elle tire son énergie de la première barre qui, elle, ralentit. Par un choix judicieux des masses et des longueurs, la vitesse de la première barre peut s'annuler lorsque les deux barres sont alignées. À cet instant, la seconde barre accapare toute l'énergie initiale et, si elle est bien plus légère que la première, sa vitesse de rotation sera beaucoup plus élevée. Notons que l'utilisateur a cédé de l'énergie uniquement à la première barre : point besoin de ressort pour déplier le bras articulé, la force centrifuge y supplée.

Comme dans le trébuchet, le mollet du footballeur a au moment de l'impact avec le ballon une vitesse de rotation bien supérieure à celle de la cuisse. Des enregistrements vidéo montrent que la rotation du mollet est d'environ 5,5 tours par seconde, contre un tour par seconde pour la cuisse.

Comment le footballeur obtient-il un tel résultat ? Dans la première phase du mouvement, il maintient sa jambe fléchie et l'angle cuisse-mollet est presque fixe : le couple musculaire accélère efficacement l'ensemble, car le moment d'inertie par rapport à la hanche est réduit. Pendant ce temps, la force centrifuge s'accroît et tend à ouvrir l'angle



2 Le mouvement de la jambe d'un footballeur qui frappe avec force un ballon est identique, dans son principe, à celui du trébuchet. L'effort porte sur la rotation accélérée de la cuisse autour de la hanche, mollet replié afin de minimiser le moment d'inertie. L'articulation du genou est ensuite relâchée afin que le mollet acquière, grâce à la force centrifuge, une rotation puissante qui s'achève lorsque la cuisse et le mollet sont alignés. Le geste du golfeur est un mouvement analogue : il fait également intervenir un pendule double, celui constitué par les bras et par le club.

cuisse-mollet. Il arrive un instant où cette force contrebalance l'inertie du mollet. Si le joueur relâche à ce moment les muscles qui gardent la jambe fléchie, le mollet est fortement accéléré. En contrepartie, la cuisse ralentit considérablement.

Un joueur entraîné peut même retarder le moment où il lâche complètement sa jambe, et ainsi favoriser le transfert de moment cinétique de la cuisse au mollet. Afin de maximiser la vitesse linéaire du pied, à vitesse de rotation donnée, il faut avoir le plus grand bras de levier, et le footballeur cherche donc à avoir la jambe droite au moment de l'impact.

La force centrifuge prend le relais des muscles

La comparaison avec le mouvement du trébuchet permet de comprendre pourquoi il n'est pas nécessaire de faire un effort pour tendre la jambe : il suffit de contrôler une extension qui se produit naturellement. Ainsi, avant le ballon, c'est son pied que le footballeur doit imaginer lancer ! Dans ces conditions, la vitesse du pied atteint les 60 kilomètres par heure, la cuisse étant beaucoup plus lente. Le ballon partira alors à plus de 100 kilomètres par heure.

La mécanique d'un swing de golf ou d'un service au tennis est similaire. Les efforts sont déployés au niveau du tronc et des bras. En revanche, les poignets doivent rester relâchés et se contenter de contrôler la position et l'orientation de la face du club ou de la raquette, il ne s'agit pas de céder de l'énergie. Les principes sont toujours les mêmes : bander les muscles moteurs ; profiter des articulations du corps pour éviter les accélérations en bloc et concentrer en quelque sorte la vitesse dans la partie qui frappe ; relâcher enfin les muscles pour donner le relais à la force centrifuge.

Le vol de l'ovale



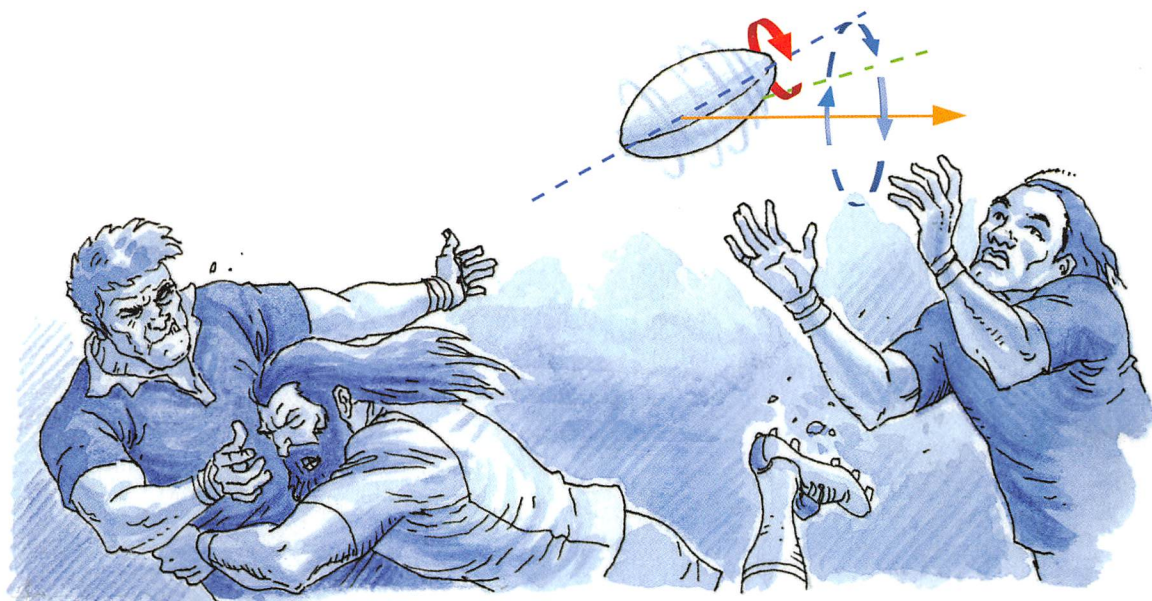
Shutterstock / Andy Heyward

Comment mieux contrôler le mouvement d'un ballon de rugby ? En le faisant tourner sur lui-même, selon un axe approprié.

Lorsque Zinédine Zidane frappait un coup franc, il brossait le ballon, c'est-à-dire qu'il le faisait tourner sur lui-même. Il s'ensuivait une trajectoire incurvée qui surprenait le gardien. Au rugby ou au football américain, la forme ovale du ballon complique sérieusement son maniement. Si les joueurs font tourner le ballon sur lui-même lors des passes à la main ou du jeu au pied, c'est avant tout pour contrôler au mieux le mouvement du ballon. Mais pourquoi en est-il ainsi ?



1 Au rugby, la passe est bien contrôlée quand le ballon est lancé à peu près horizontalement, son grand axe étant aligné dans la même direction, et en lui imprimant une rotation autour de cet axe. Dans ce cas, l'axe du ballon garde une direction constante.



2 Quand le ballon tourne autour d'un axe qui n'est pas l'un de ses axes de symétrie, ce mouvement peut être décrit comme une rotation autour du grand axe, cet axe tournant lui-même autour du vecteur moment cinétique (qui est constant si aucun couple n'est exercé).

Lorsqu'il effectue une passe à la main, le joueur de rugby doit s'assurer de la bonne réception du ballon par son partenaire. Il doit ajuster non seulement la vitesse initiale de son ballon, mais aussi la façon dont le ballon tourne sur lui-même. D'expérience, le joueur envoie le ballon horizontalement, avec son grand axe aligné dans la direction du jet, et en lui imprimant une rotation autour de cet axe. Le ballon file alors bien droit (voir la figure 1). Mais que le joueur donne un coup de poignet intempestif et le ballon se met à osciller le long de la trajectoire, ce qui rend sa réception plus difficile.

Quelle est l'origine de ces oscillations ? Elles ne sont pas dues aux forces qui agissent sur le ballon : le poids n'exerce aucun couple de forces, et le frottement de l'air est négligeable aux faibles vitesses. En fait, ce mouvement oscillatoire est... naturel.

Une oscillation naturelle de l'axe

Une loi fondamentale de la physique stipule qu'en l'absence de couple exercé sur un objet, le vecteur moment cinétique de celui-ci reste constant en grandeur et en direction. Cette loi de conservation est particulièrement simple quand le solide tourne selon un axe de symétrie : dans ce cas, le moment cinétique est le produit de la vitesse de rotation par le moment d'inertie (grandeur qui caractérise la répartition de la masse autour de l'axe), et sa direction est celle de l'axe de rotation. La conservation du moment cinétique implique alors que la vitesse et l'axe de rotation sont constants.

C'est ce qui arrive au ballon de rugby lorsqu'il tourne autour de son grand axe ou de n'importe quel axe perpendiculaire passant par le centre. Que se passe-t-il lorsque la rotation initiale du ballon ne s'effectue pas autour d'un de ses axes de symétrie ? Dans ce

cas, les divers moments d'inertie (selon les différents axes) du ballon interviennent dans la relation entre rotation et moment cinétique, et l'on démontre que l'axe de rotation n'est plus aligné avec le moment cinétique.

Plus précisément, on trouve qu'au cours du mouvement, le ballon conserve sa vitesse de rotation autour de son grand axe, mais ce dernier tourne lui-même – les physiciens disent «précèsses» – autour de l'axe du moment cinétique, qui est fixe (*voir la figure 2*).

Le ballon semble ainsi tanguer le long de sa trajectoire.

Quand le ballon est assez rapide, des forces aérodynamiques entrent en jeu. La résistance de l'air ne perturbe guère une passe à la main. Cependant, comme la force de frottement entre un projectile et l'air augmente comme le carré de la vitesse, elle devient cruciale lors des lancers à la main dans le football américain (la vitesse initiale peut atteindre 20 mètres par seconde) ou pour les ballons tirés avec le pied.

Là encore, la forme ovale complique les choses. L'inclinaison du ballon joue sur la force de frottement de deux façons, car elle modifie à la fois la surface frontale et l'écoulement de l'air autour du ballon. Lorsque le grand axe du ballon est perpendiculaire au déplacement au lieu de lui être parallèle, la surface frontale est supérieure d'environ 50 pour cent, et le coefficient de traînée augmente de près d'un facteur 10. La force de frottement est ainsi accrue d'un facteur 15.

Pour envoyer le ballon à grande distance, on a ainsi intérêt à le lancer pointé le mieux possible dans la direction de son mouvement. Cela assure en outre qu'aucun couple n'agit sur le ballon, puisque la force de frottement résultante passe alors par son centre. À mesure que le ballon s'élève, son grand axe garde la même direction (s'il a été bien lancé !). Mais sous l'effet de la pesanteur, la direction de sa vitesse se modifie : initialement dirigée vers le haut, elle s'incline de plus en plus jusqu'à pointer vers le bas lors de la retombée. Autrement dit, le grand axe du ballon est de moins en moins aligné avec le déplacement.

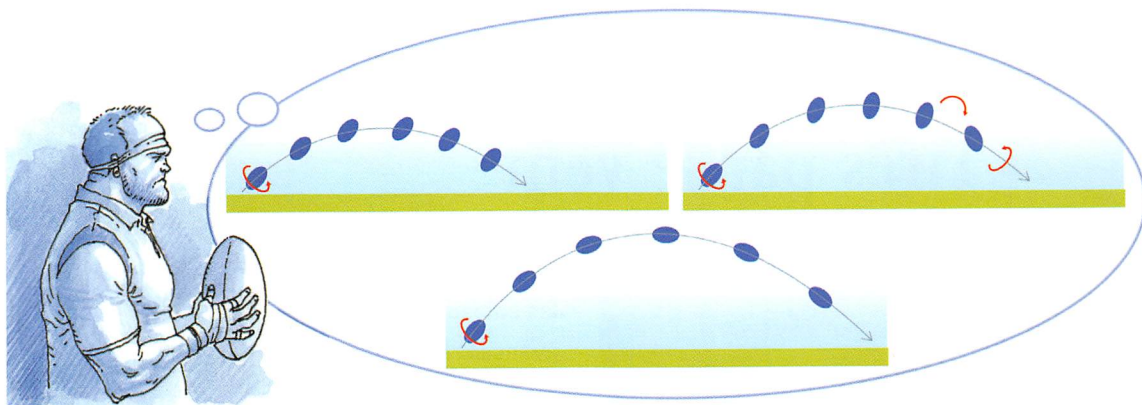
Des effets gyroscopiques

Conséquence : la traînée augmente considérablement et, de plus, exerce un couple. Le ballon se met à tourner en retombant (*voir la figure 3*). Pas facile à réceptionner ! Une rotation assez rapide du ballon sur lui-même résout ce problème, grâce à de subtils effets dits gyroscopiques : face aux couples perturbateurs dus à la résistance de l'air, la rotation maintient le ballon aligné le long de sa trajectoire.

Tout se passe comme avec une toupie. Lâchée presque verticale avec une grande vitesse de rotation, puis légèrement poussée, elle conserve son orientation verticale, qui correspond à l'annulation du couple exercé par le poids (par rapport au point de contact de la toupie avec le sol). Dans le cas du ballon de rugby, la force est la traînée, opposée à la vitesse, et le grand axe du ballon reste parallèle à la vitesse parfois pendant toute la trajectoire. Il faut cependant un lancer précis pour que l'axe de rotation, la vitesse et le grand axe soient alignés. Sinon, on obtient des mouvements très variés !

L'histoire ne s'arrête pas là, car, à vitesse élevée, de nouveaux effets aérodynamiques apparaissent. Des mesures ont ainsi montré que lorsque le ballon tourne vite autour de son grand axe (on atteint les dix tours par seconde), la traînée est réduite d'environ dix pour cent, un effet dû à la modification du sillage turbulent du ballon. Et très récemment, des chercheurs





3 Mis en rotation autour de son grand axe et lancé à faible vitesse (*en haut à gauche*) dans cette direction, un ballon ovale garde la même orientation (celle du moment cinétique) le long de sa trajectoire. À vitesse plus élevée (*en haut*

à droite), le frottement de l'air finit par exercer un couple qui fait basculer et tourner le ballon. Si la rotation est assez rapide (*en bas*), le mouvement est stabilisé comme pour une toupie et l'axe du ballon suit la direction de la trajectoire.

japonais ont montré que les quatre coutures longitudinales du ballon sont à l'origine de forces pouvant engendrer des mouvements latéraux de quelques centimètres d'amplitude.

On comprend ainsi la difficulté des pénalités et des transformations. Lorsqu'on frappe un ballon posé au sol, il est bien difficile de le faire tourner autour de son grand axe, tout en alignant celui-ci dans la direction du mouvement. Le plus souvent, le joueur fait tourner le ballon selon un axe perpendiculaire au mouvement; dans ce cas, la traînée est plus forte et la stabilisation par rotation n'est plus assurée.

Certains joueurs arrivent cependant à donner la bonne combinaison cinématique à leur ballon. Hélas pour l'équipe de France de rugby, les *All Blacks* néo-zélandais ont leur Zidane en la personne de Daniel Carter, qui marque régulièrement des pénalités... en brossant très nettement le ballon. Il fait tourner le ballon autour de son grand axe, celui-ci étant légèrement incliné par rapport à la verticale. Il parvient ainsi à donner au ballon une trajectoire qui dévie latéralement de plusieurs mètres. À la lumière de ce qui précède, on ne peut que s'incliner devant une telle maîtrise... tout en souhaitant une méforme de D. Carter le jour d'une rencontre *All Blacks*-France!



Tirés par le vent



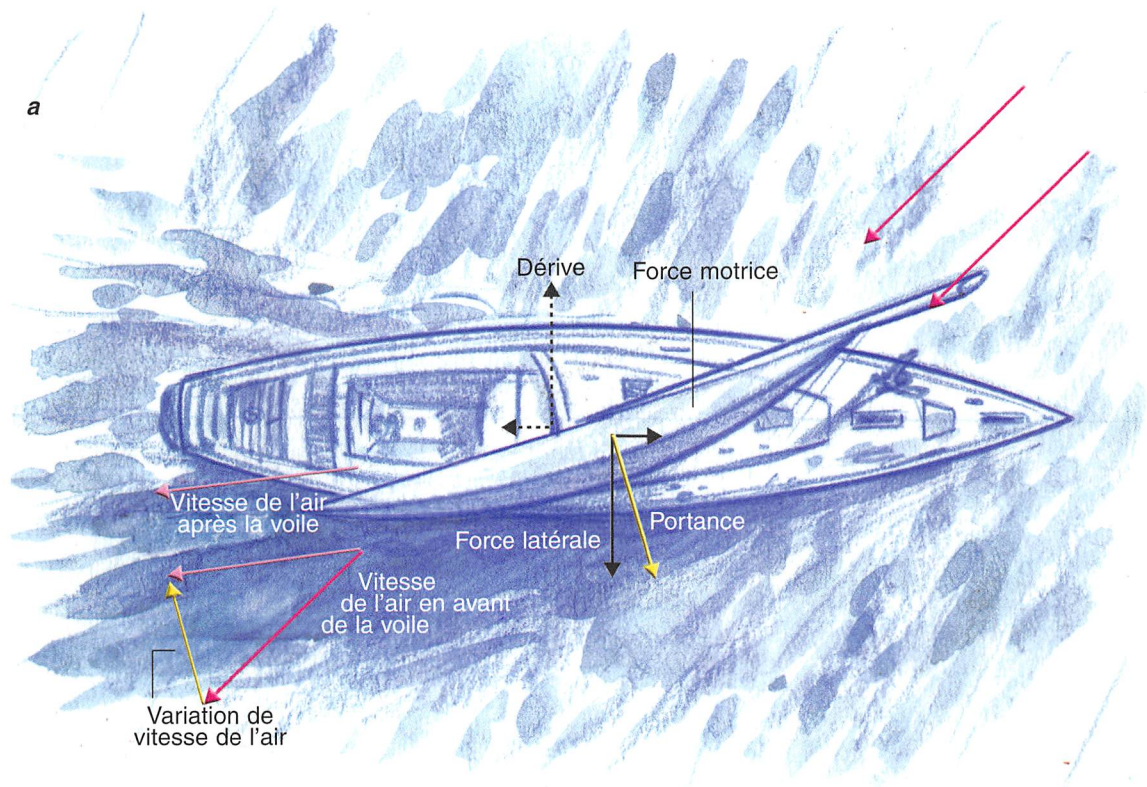
Shutterstock / Focusmotions

En utilisant le vent créé par leur mouvement, les bateaux et les chars à voile avancent plus vite que le vent !

Quelle est la vitesse maximale d'un char à voile propulsé par un vent soufflant à 50 kilomètres par heure ? La réponse du Breton Tadeo Normand est... trois fois la vitesse du vent, soit 151,9 kilomètres par heure : son record du monde datant de l'an 2000 et établi sur la plage de Leucate, en Méditerranée. Pour réaliser cet exploit, il faut tout d'abord maîtriser la voile qui, telle une aile d'avion verticale, tire le véhicule vers l'avant plus qu'elle ne le pousse. Et, en profitant de la vitesse acquise, on peut parvenir à aller plus vite que le vent. Cela ne se fait pas sans une grande habileté où l'expérience du marin rencontre... l'analyse du physicien.

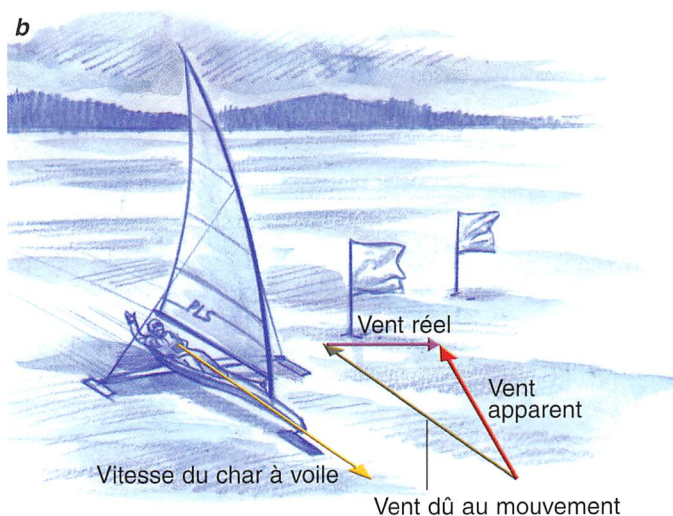
Forces aérodynamiques

Intuitivement, on pense que le vent pousse un navire ou un char à voile. Comment le vent peut-il tirer un navire ? Grâce à la force hydrodynamique que subit tout obstacle qui modifie la vitesse d'un écoulement, et que l'usage décompose en une force parallèle à l'écoulement, la traînée, qui entraîne l'obstacle dans le flux, et une force perpendiculaire, la portance. Ces forces, présentes dès qu'un fluide et un objet sont en mouvement relatif, croissent avec leur vitesse relative. Lorsqu'un navire est vent arrière (soufflant dans l'axe du bateau) et gonfle son spinnaker (la « voile parachute » que l'on hisse à cette allure), la voile stoppe l'écoulement et c'est la force de traînée qui pousse le navire dans le sens du vent. En revanche, lorsque le navire est vent de travers ou s'il « remonte » le vent (en ayant de plus en plus le vent de face), la voile ne stoppe pas le flux d'air, mais



le dévie. L'écoulement de l'air qui arrive de biais sur le voilier est redirigé par la voile vers l'arrière. Il en résulte – selon le principe classique de l'action et de la réaction – une force propulsive vers l'avant. À cette force, s'en ajoute une latérale, mais les roues du char à voile ou la dérive du navire évitent – ou du moins réduisent – le mouvement de dérive (voir la figure 1). Avant le démarrage, lorsque le navire ou le char à voile sont immobiles, la situation est relativement simple : vent arrière, la voile est poussée tel un parachute, tandis que vent de côté, elle est tirée comme une aile d'avion.

Lorsque la vitesse augmente, les forces changent, car le vent est modifié. Imaginons un char à voile se déplaçant dans la même direction que le vent (venant par l'arrière) et à la même vitesse. Accompagnant l'écoulement, la voile ne le modifie pas, elle ne subit aucune force motrice : le char à voile ralentit. S'il va plus vite que le vent, la voile reçoit un vent apparent provenant de l'avant : le char est freiné. Il semble

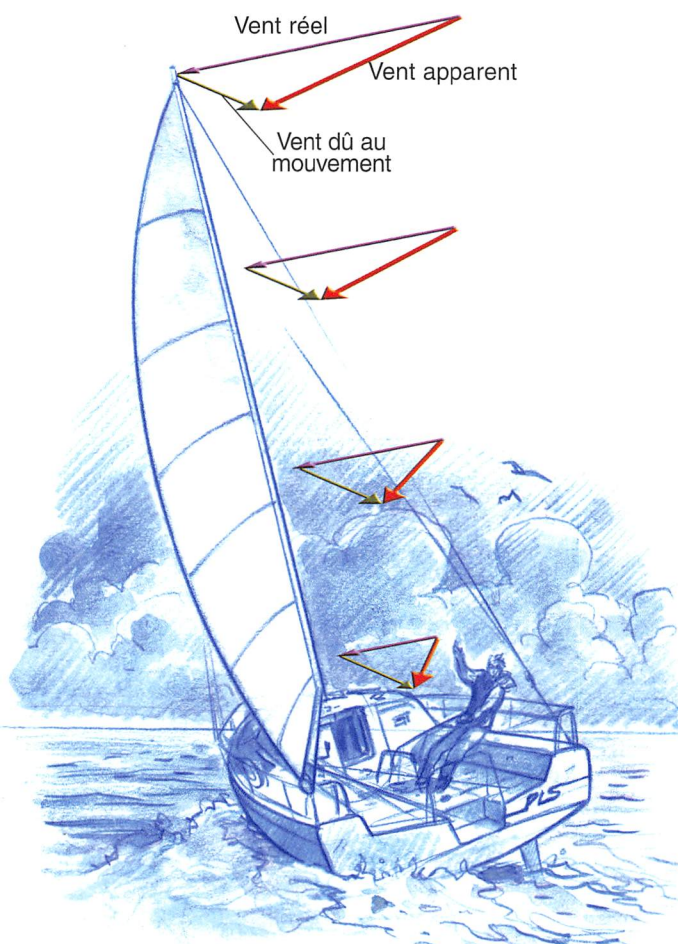


1 La composition du vent réel et du vent apparent impose sa vitesse au bateau (a). La force de portance (en jaune) naît de la déviation de l'air par la voile, et de la variation de la vitesse de l'air qui en résulte (en rose foncé avant la voile et en rose clair après). Cette force se décompose en une force motrice et une force latérale, laquelle donne naissance à la dérive (en partie compensée par la quille d'un bateau). La vitesse d'un char à voile sur glace (b) dépasse parfois celle du vent réel : le vent apparent (en rouge) est la résultante du vent réel (en violet) et du vent dû au mouvement (en vert) qui est opposé à la vitesse du char (en jaune).

par conséquent impossible d'aller plus vite que le vent quand on se déplace dans la même direction. Essayons de nous placer vent de travers, c'est-à-dire perpendiculairement au vent. Orientons la voile de sorte qu'elle dévie l'air vers l'arrière et commençons à avancer. Lorsque nous prenons de la vitesse, le vent apparent (celui que nous recevons et qui agit sur la voile) est dû à la composition du mouvement de l'air et du mouvement du char. Si nous sommes vent de travers, la composante latérale du vent est inchangée, mais un vent de face dont la vitesse est égale et opposée à celle de notre mouvement s'ajoute à ces mouvements. Lorsque nous nous déplaçons à une vitesse égale à la vitesse du vent, nous recevons un vent orienté à 45 degrés dont la vitesse est égale à la vitesse du vent réel multipliée par la racine carrée de deux : nous avançons plus vite que le vent réel. Puisque la direction du vent qui arrive dans la voile a changé, il faut revoir les réglages et «border» la voile, c'est-à-dire réduire l'angle qu'elle fait avec la direction du char. Ensuite, puisque la vitesse du vent apparent a augmenté, la force qui s'exerce sur la voile (proportionnelle au carré de cette vitesse) a également augmenté (dans notre exemple, elle double). La force latérale qui s'exerce sur le véhicule croît : les efforts latéraux sur les roues deviennent importants, de même que le couple qui tend à faire basculer le char sur le côté.

Remonter le vent arrière !

Notre vitesse réelle peut-elle dépasser celle du vent réel ? Oui : grâce à notre vitesse, nous créons un vent qui nous propulse d'autant plus que nous allons vite (*voir la figure 1*). À mesure que la vitesse augmente, l'intensité de ce vent apparent augmente, ce qui est un avantage, mais la direction de ce vent se rapproche du vent de face. Cette situation n'est pas optimale, car lorsque le vent est trop proche du vent de face, la force exercée sur la voile est quasi perpendiculaire au char et perd sa nature propulsive. Chaque fois que la direction du vent s'approche trop de l'axe du

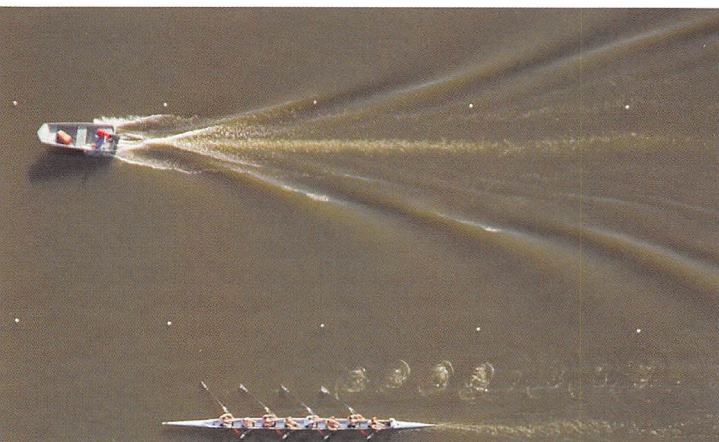


2 La direction et l'intensité du vent changent avec la hauteur du mât et s'annulent à la surface de la mer. Pour que le vent apparent (*en rouge*) soit toujours parallèle au bord d'attaque de la voile (près du mât), il faut vriller la voile, soit en la bordant, soit, sur les voiles semi-rigides, en imposant un mouvement de vrille à la partie supérieure de la voile au moyen d'un moteur électrique situé en haut du mât.

char, il faut changer de direction et augmenter l'angle entre la vitesse et le vent. La direction prise par le char à voile quitte le vent de travers pour se rapprocher du vent arrière. Toutefois, grâce à la vitesse acquise, le vent apparent arrive sur la voile par l'avant du char, plutôt que par l'arrière, ce qui correspond à un fonctionnement de la voile reposant sur la portance. On peut voir un char à voile dont la vitesse est orientée à une trentaine de degrés du vent arrière, mais pour qui le réglage des voiles correspond à un vent apparent dirigé à une trentaine de degrés du vent de face. Ainsi le char peut continuer à accélérer et atteindre des vitesses bien supérieures à la vitesse du vent. Grâce aux frottements moindres, les chars sur glace ont des performances encore supérieures et dépassent 170 kilomètres par heure, le record de 1938 de John Buckstaff étant estimé à 230 kilomètres par heure !

Dans le cas des bateaux, les performances sont inférieures essentiellement parce que les frottements hydrodynamiques sur la quille sont très supérieurs à ceux que subit un char glissant sur la glace. On ne peut espérer atteindre trois fois la vitesse du vent comme pour les chars sur glace : rares sont les bateaux qui dépassent la vitesse du vent réel, les meilleures performances étant atteintes pour des bateaux qui surfent sur l'eau grâce à des flotteurs. Dans cette course à la vitesse, il reste important de dompter efficacement le vent. Dès lors, pourquoi ne pas remplacer la voile souple par une aile rigide ? Une difficulté surgit : la vitesse du vent réel change assez rapidement avec l'altitude. Elle s'annule au voisinage de la surface de l'eau à cause des frottements avec la mer, mais augmente ensuite avec l'altitude. Dans le cas des voiliers dont la hauteur du mât peut atteindre une trentaine de mètres, l'effet est marqué : le vent apparent est plus intense en haut du mât qu'en bas de quelques mètres par seconde, et sa direction peut tourner d'une dizaine de degrés (*voir la figure 2*). En conséquence, il faut vriller la voile le long du mât pour qu'elle change d'orientation avec la hauteur, et que le vent apparent reste parallèle à la voile, au niveau du mât. Jusqu'à présent, seule la toile permettait d'ajuster le profil de la voile aux conditions de navigation, en particulier le vrillage sur la hauteur. Aujourd'hui, apparaissent de nouvelles voiles ailes semi-rigides. Plus épaisses, elles sont plus performantes au plan aérodynamique que les voiles « classiques ». On contrôlerait leur vrillage à l'aide d'un petit moteur électrique placé en haut du mât. Indispensable quand le mât atteint – comme sur certains bateaux de course – quasiment la hauteur de l'Arc de triomphe...

Dans le sillage des navires



À la surface de l'eau, tous les sillages ont une géométrie globalement identique. Contrairement aux sillages des avions...

Observez le sillage tracé sur l'eau par un canard, une barque ou un cargo. Si le détail des vagues formées diffère, la forme générale du sillage est la même : l'eau est perturbée dans un secteur dont l'angle au sommet est de 39 degrés. Cette valeur est universelle, quelles que soient la taille ou la vitesse du mobile qui vogue. Comment comprendre ce phénomène ? Peut-on le comparer à celui des avions lorsqu'ils dépassent le mur du son ?

Lorsqu'un avion vole, il perturbe l'air et engendre des ondes acoustiques. Le son émis par l'avion à un instant donné se propage à partir du lieu d'émission dans toutes les directions à vitesse constante, celle du son. Ainsi, l'énergie sonore émise par l'avion à des instants successifs dessine des sphères centrées sur les positions que l'avion a occupées et dont le rayon croît proportionnellement au temps écoulé depuis l'émission.

Un mur de son en forme de cône

Lorsque l'avion va moins vite que le son, ces sphères sont emboîtées et il n'y a pas d'accumulation d'énergie dans certaines régions de l'espace (*voir la figure 1*). En revanche, si l'avion vole plus vite que le son, il laisse l'énergie émise derrière lui. Celle-ci se retrouve à l'intérieur d'un cône, dit de Mach, dont l'avion est le sommet et dont la frontière est l'enveloppe des sphères sonores. Sur cette surface conique, transition entre la zone calme et la zone sonore, il y a accumulation d'énergie : c'est l'onde de choc provoquée par les avions supersoniques. Plus l'avion est rapide, plus l'angle au sommet du cône est petit.

Examinons maintenant le sillage d'un bateau. Sa forme détaillée est complexe et varie selon la forme de la coque et la vitesse du navire. Au XIX^e siècle, lord Kelvin, alias William Thomson, fut le premier à décrire les caractéristiques universelles des sillages et la forme incurvée des vagues qui les délimitent.

Les détails du sillage traduisent les interférences entre les diverses ondes émises par le bateau, et leur calcul général est délicat. Mais, comme nous l'avons noté, si tous les sillages sont différents, la zone qu'ils délimitent est toujours un secteur angulaire de 39 degrés. Pour comprendre pourquoi, intéressons-nous d'abord aux ondes sinusoïdales élémentaires créées par un bateau lors de son déplacement. Il convient de bien distinguer la propagation de ces ondes de la propagation de l'énergie, c'est-à-dire des vagues constituées par la superposition des ondes élémentaires.

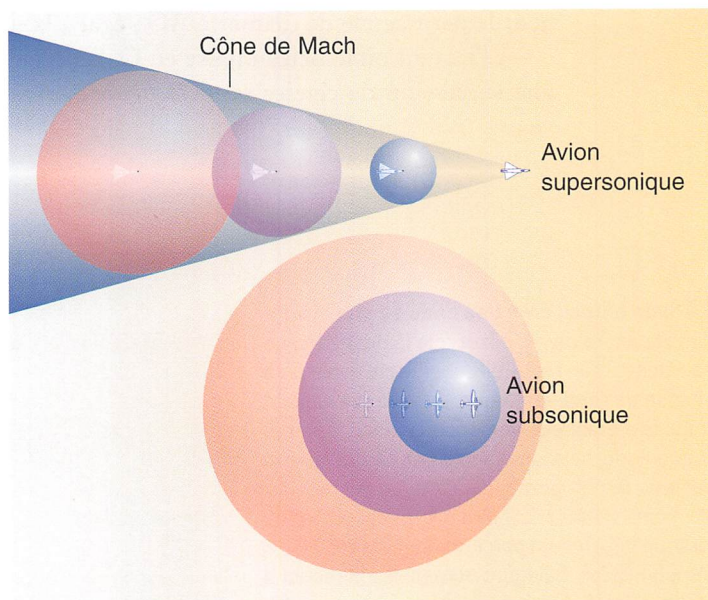
Lorsque l'eau est assez profonde, la vitesse des ondes sinusoïdales qui se propagent en surface dépend de leur longueur d'onde, c'est-à-dire de la distance entre deux crêtes successives. Plus précisément, la vitesse d'une telle onde sinusoïdale est proportionnelle à la racine carrée de sa longueur d'onde.

Des ondes qui font des vagues

Une conséquence importante est qu'une vague ne se propage pas de la même façon que les ondes sinusoïdales qui la composent. Puisque ces ondes élémentaires ont des vitesses différentes, elles se décalent les unes par rapport aux autres, ce qui modifie la position où leurs amplitudes s'additionnent et construisent la vague. Ainsi, la vitesse du paquet d'ondes formant la vague diffère de celle des ondes qui le composent. Un calcul détaillé montre que, dans l'eau, la vitesse de propagation de la vague (ou de l'énergie) est égale à la moitié de la vitesse moyenne des ondes élémentaires (si ces ondes ne sont pas trop différentes).

La déformation de la surface de l'eau dans un sillage est complexe, mais, en raison de l'invariance dans le temps de la situation (le bateau engendre un écoulement constant), elle suit le bateau en conservant le même aspect. Cela signifie que les ondes produites par le bateau se propagent de telle façon que leur position par rapport à lui reste inchangée.

Examinons pour commencer les ondes qui se propagent dans la même direction que le bateau. On les voit le long de la coque et surtout



1 Avec un avion supersonique, les sphères correspondant à la propagation des ondes sonores émises aux positions successives forment un cône, le cône de Mach, où s'accumule l'énergie acoustique. Si l'avion vole à une vitesse inférieure à celle du son, les différentes sphères sont emboîtées, et l'énergie ne se concentre pas localement.

à l'arrière. Il s'agit d'ondulations dont la crête est perpendiculaire à la vitesse du bateau. Ces ondes avancent à la même vitesse que le bateau : c'est pourquoi leur longueur d'onde est proportionnelle au carré de la vitesse du navire.

Pour analyser une onde (sinusoïdale) qui se propage de biais, décomposons la vitesse du bateau comme la somme d'une vitesse parallèle à la vitesse de propagation de cette onde et d'une vitesse perpendiculaire. La composante perpendiculaire correspond à un déplacement parallèle aux crêtes de l'onde, et ne modifie donc pas la position du bateau par rapport aux crêtes. Par conséquent, pour que la position relative bateau-onde soit constante, la projection de la vitesse du bateau sur la direction de propagation de l'onde doit être égale à la vitesse de cette onde.

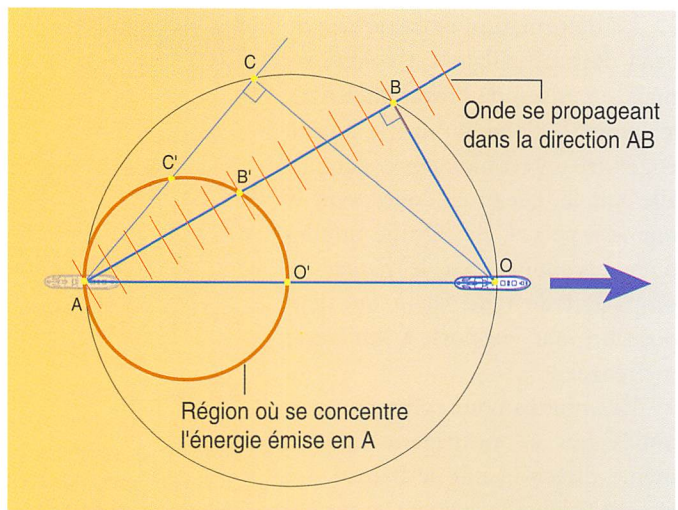
Détaillons cela (voir la figure 2). Notons O la position actuelle du bateau et intéressons-nous aux ondes émises quand il était en un point A. Traçons la vitesse du bateau en choisissant l'échelle telle que son module sur le dessin corresponde à la distance AO. Cela revient à représenter les vitesses par les distances parcourues durant le temps mis par le bateau pour aller de A à O.

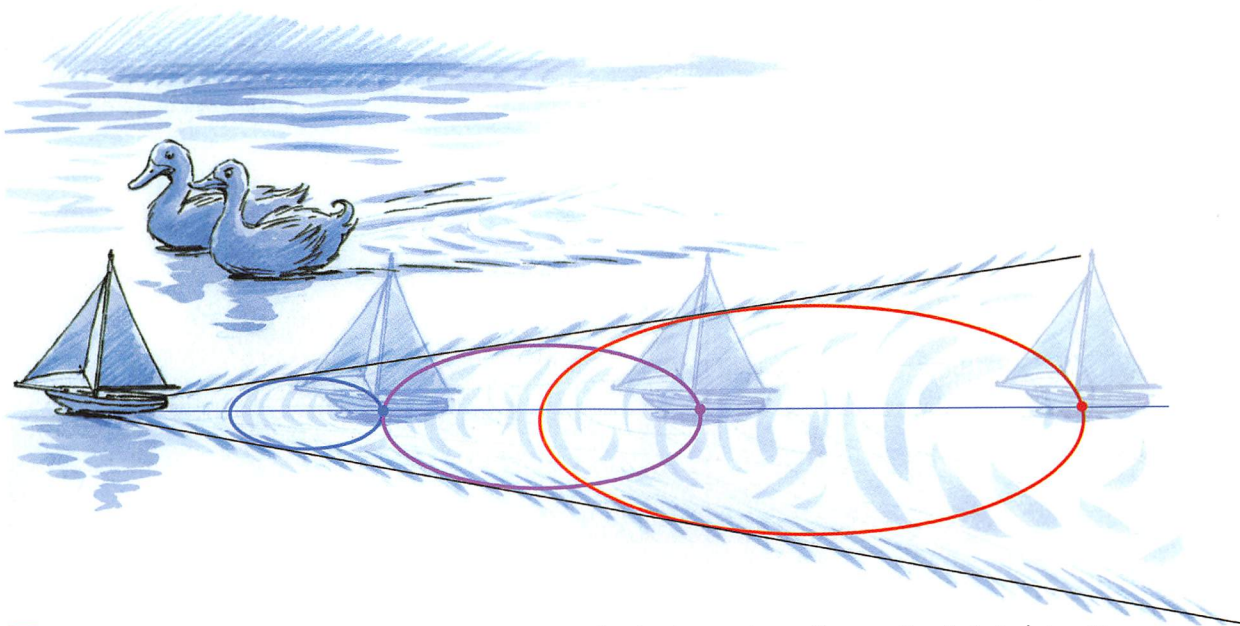
Considérons l'onde émise dans une direction AB donnée : la projection du vecteur vitesse \overrightarrow{AO} sur cette droite est le vecteur \overrightarrow{AB} . C'est ce vecteur qui caractérise la vitesse des ondes émises par le bateau dans la direction choisie. Les segments AB et OB sont perpendiculaires. De même, pour une direction OC quelconque, les segments AC et OC sont perpendiculaires ; aussi, en faisant varier le point C, le cercle de diamètre AO se dessine.

Qu'en est-il maintenant des vagues, superpositions de toutes les ondes élémentaires ? Les vagues se propagent deux fois moins vite que les ondes élémentaires qui les composent. Ainsi, l'énergie émise dans la direction AB se retrouve au point B' situé au milieu du segment AB. Et lorsqu'on fait varier la direction, les points C' obtenus dessinent le petit cercle de diamètre AO', égal à la moitié du diamètre AO.

À l'instant où le bateau passe en O, l'énergie qu'il a émise auparavant dessine donc une succession de cercles (voir la figure 3). Le dessin ressemble à celui fait pour un

2 Si un bateau crée une onde se propageant dans la direction AB, il faut que la projection de sa vitesse sur cette direction soit égale à la vitesse de l'onde pour que le motif des vagues reste le même relativement au bateau. Géométriquement, cela se traduit par le fait que le vecteur \overrightarrow{OB} est perpendiculaire au vecteur \overrightarrow{AB} (le point B étant le point d'arrivée de l'onde lorsque le bateau a parcouru la distance AO). Il s'ensuit qu'en balayant toutes les directions AC, le point C décrit le cercle de diamètre AO. L'énergie se propageant deux fois moins vite que l'onde, elle se concentre sur les points C', milieux des segments AC : l'énergie émise en A se concentre alors sur le cercle de diamètre AO', où O' est le milieu de AO.





3 Le petit bateau crée un sillage délimité par tous les cercles de vagues (ou d'énergie) produits aux instants successifs. Par exemple, le cercle rouge correspond aux vagues créées par le bateau lorsqu'il était dans sa posi-

tion la plus ancienne (*la première à droite*). Le sillage dessine alors un secteur d'angle constant, égal à 39 degrés quelles que soient la forme ou la vitesse du bateau... ou du canard.

avion, mais le bateau n'émet pas les mêmes ondes de façon isotrope. À chaque instant, il envoie des ondes vers l'avant en « poussant l'eau », mais, comme ces ondes sont plus lentes que lui, il les dépasse. Autrement dit, l'énergie émise se retrouve à l'intérieur du cône de sommet O et tangent au cercle de diamètre AO'. Avec un peu de trigonométrie, on calcule que l'angle au sommet est de 39 degrés.

La construction géométrique du sillage est ainsi toujours la même, à la différence du cône de Mach créé par un avion supersonique. Cette différence provient du fait que les ondes sonores ont une vitesse fixe : la vitesse du son. Les ondes à la surface de l'eau, elles, n'ont pas de vitesse caractéristique : à chaque vitesse de propagation, adaptée au bateau, correspond une onde.



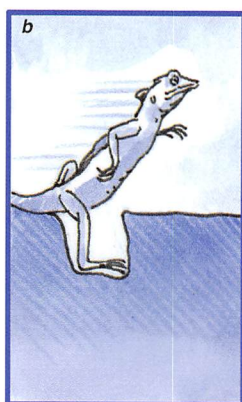
Marcher sur l'eau ? pas de lézard !

Il n'y a pas de miracle : pour marcher sur l'eau, il faut courir, et même courir vite. Les basilics d'Amérique centrale le prouvent.

Un basilic.

Les amateurs de ricochets ou de ski nautique savent que l'eau liquide peut supporter le poids d'une pierre ou d'un être humain au moins quelques instants. Mais l'homme pourrait-il marcher sur l'eau sans assistance ? Peut-il imiter les lézards d'Amérique tropicale du genre *Basiliscus*, qui arrivent à courir sur l'eau à la vitesse d'environ dix kilomètres par heure ? Pour le savoir, il faut d'abord comprendre comment font ces basilics.

Certains insectes, tel le gerris, marchent sur l'eau. Quel est leur secret ? La surface de l'eau se comporte comme une mince pellicule élastique. En réponse à la déformation que



1 Chaque foulée de la course d'un basilic sur l'eau comporte trois étapes : la frappe du pied sur la surface de l'eau [a], l'enfoncement de la patte qui crée une poche d'air dans l'eau [b, c] et le retrait rapide de la

patte, avant que la cavité d'air ne se referme [d]. L'intervalle de temps entre deux foulées est de quelque 70 millisecondes. La vitesse de déplacement atteint une dizaine de kilomètres par heure.

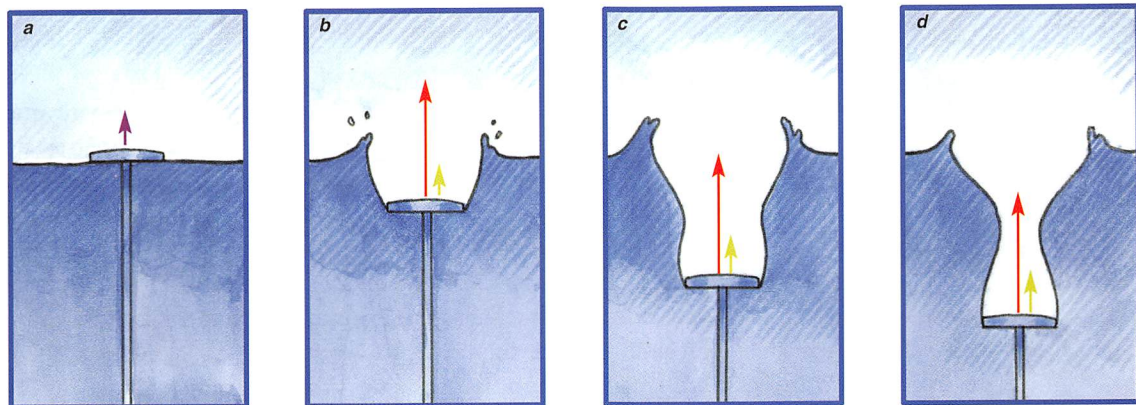
lui fait subir l'insecte, cette pellicule exerce une force dont l'amplitude est de l'ordre du produit du périmètre de contact par la tension superficielle de l'eau (0,07 newton par mètre). C'est suffisant pour soutenir une punaise. Mais pour un homme, il faudrait un tour de pied de plusieurs kilomètres !

Dès que le poids dépasse quelques dizaines de grammes, il faut chercher autre chose. En 1996, James Glasheen et Thomas McMahon, du MIT, ont filmé avec une caméra ultra-rapide la course d'un basilic sur l'eau. La vidéo a révélé que chaque pas se décompose en trois étapes : le lézard frappe la patte à plat sur l'eau, l'enfonce, puis la soulève rapidement (voir la figure 1). Quel est l'apport de chaque phase ?

La première étape ressemble fort au « plat » d'un plongeur. En frappant l'eau, la patte lui cède une partie de sa quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) et accélère un petit volume d'eau. En réaction, l'eau exerce une force sur le pied et le ralentit.

Une patte surmontée d'air

Estimons l'amplitude de cette force. Pour un basilic de taille moyenne (90 grammes), la surface du pied est d'environ cinq centimètres carrés et vient frapper l'eau à environ deux mètres par seconde. En supposant que le volume d'eau affecté soit aussi profond que large, on obtient 11 centimètres cubes d'eau, soit 11 grammes. D'après les vidéos, la patte est peu ralentie par l'impact : l'eau est donc entraînée à la vitesse du pied. Cela correspond à une quantité de mouvement de 22 grammes-mètres par seconde. La force correspondante s'obtient en divisant cette valeur par la durée de l'impact. Sachant que la cadence est d'une foulée toutes les 70 millisecondes, la force moyenne engendrée par l'impact entre deux foulées successives est de 0,3 newton : de quoi soutenir 30 grammes, soit le tiers seulement du poids de l'animal.



2 Pour comprendre la marche aquatique du basilic, il faut d'abord étudier un cas plus simple : l'enfoncement vertical d'un disque. Au moment de la frappe [a], le disque cède une partie de sa quantité de mouvement à l'eau, ce

qui correspond à une force d'impact (en violet). L'eau exerce ensuite sur le disque deux forces verticales [b, c, d] : une force de traînée (en rouge) et une force due à la pression hydrostatique (en vert).



3 Des robots marcheurs capables de se déplacer à la surface de l'eau : c'est ce que plusieurs équipes de chercheurs tentent de développer. Certaines essayent d'imiter la méthode des gerris (punaises aquatiques), fondée sur la tension superficielle de l'eau et qui n'est adaptée qu'aux petites tailles et masses. D'autres s'inspirent du basilic.

La deuxième étape est surprenante: le pied du basilic s'enfonce si rapidement que l'eau ne le recouvre pas instantanément. Un trou d'air de plusieurs centimètres de profondeur se crée dans l'eau. Comme le mouvement du pied du basilic est complexe, on peut mieux comprendre ce qui se passe avec le cas plus simple d'un disque plat s'enfonçant dans l'eau à vitesse constante (*voir la figure 2*). Si sa vitesse est assez élevée, le disque chasse l'eau et crée derrière lui une cavité cylindrique. Ensuite, l'eau des parois de la cavité se met en mouvement et le cylindre d'air rétrécit jusqu'à disparaître. Durant toute cette phase, le disque subit une force de traînée hydrodynamique. S'y ajoute une force hydrostatique: au-dessus du disque règne la pression atmosphérique, tandis qu'au-dessous elle est augmentée de la pression hydrostatique, qui croît avec la profondeur.

Que valent ces deux forces pour le pied du basilic? Sachant que la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse, à la surface du pied et à la masse volumique de l'eau, avec un coefficient numérique de l'ordre de 0,5, on obtient une traînée égale à un

newton. Par ailleurs, à cinq centimètres de profondeur, la pression de l'eau est de 500 pascals, d'où une force hydrostatique de 0,25 newton. On a au total 1,25 newton, de quoi soutenir environ 125 grammes.

Cependant, la force ne s'exerce pas en permanence puisque le basilic rétracte son pied. La phase d'appui ne dure que 45 millisecondes, sur les 70 qui séparent deux appuis. La force moyenne exercée par l'eau est donc de 0,8 newton. Elle est légèrement inférieure au poids du basilic, mais, avec l'impact initial, le lézard a de quoi marcher sur l'eau.

On peut admirer avec quelle habileté le basilic retire son pied avant que la cavité ne se referme. Cette troisième étape lui est indispensable. Sinon, il devrait vaincre la résistance de l'eau, qui serait alors orientée vers le bas et s'ajouterait au poids ! Cette condition impose le rythme des foulées. En effet, une fois la cavité formée, seule la pression hydrostatique agit latéralement sur les parois. Comme son origine est le poids de l'eau, tout se passe comme si les parois étaient accélérées par la pesanteur : le temps que met la cavité pour se combler est donc de l'ordre de la durée d'une chute libre sur une distance égale à son rayon. On obtient environ 50 millisecondes pour un rayon de un centimètre, valeur très proche de celles observées.

La performance est surhumaine

Les estimations précédentes ne donnent cependant pas toute la mesure des phénomènes. Notamment, ceux-ci dépendent de façon complexe de la taille du lézard. Les très jeunes basilics pèsent deux grammes et peuvent développer le double de ce qui est nécessaire pour courir sur l'eau. Leur marge est telle qu'ils peuvent démarrer dans l'eau : ils se propulsent d'abord en surface, puis enchaînent en courant. Pour les plus âgés, qui font 200 grammes et plus, la marge est très réduite ; pour courir sur l'eau, ils doivent démarrer sur la terre ferme.

Et l'homme ? Pourrait-il soutenir son poids en frappant l'eau de ses pieds ? Sans intervention divine, la partie n'est pas gagnée ! Pour porter ses 70 kilogrammes avec une plante de pied de 300 centimètres carrés, il aura besoin d'une vitesse d'impact de sept mètres par seconde. Cela correspond à une puissance de cinq kilowatts, très supérieure à celle d'un athlète (de l'ordre de 1,5 kilowatt en sprint). Et en tenant compte de la durée réduite du contact par rapport à la foulée et des forces horizontales, J. Glasheen et Th. McMahon ont estimé qu'il faudrait en réalité une vitesse d'impact de 30 mètres par seconde...

Oublions l'homme, pensons aux machines. Plusieurs équipes dans le monde tentent de mettre au point des robots imitant nos amis les bêtes. Une équipe américaine, à l'Université Carnegie Mellon, s'inspire ainsi du basilic et a étudié les forces que peut développer un robot marcheur à deux ou quatre pattes (*voir la figure 3*). Les premiers essais sont concluants : avec un seul moteur pour animer toutes les pattes, elle a réussi à produire une force de sustentation de 32 grammes par watt pour un robot à deux pattes, et de 55 grammes par watt pour quatre pattes. Reste à réaliser un robot qui tienne tout seul en équilibre...

CHAPITRE I - BULLES ET CRACS

Pastilles et soda : une rencontre explosive

T. S. Coffey, *Diet Coke and Mentos: What is really behind this physical reaction?*, in *American Journal of Physics*, vol. 76, pp. 551-557, juin 2008.

Vidéos d'expériences : www.eepybird.com/dcm1.html, www.eepybird.com/exp214.html

Craquements de doigts

D. R. Kimbrough, *Henrylaw and noisy knuckles*, in *Journal of Chemical Education*, vol. 76, n° 11, p. 1509, 1999.

R. Brodeur, *The audible release associated with joint manipulation*, in *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 18, n° 3, pp. 155-164, 1995.

Site Web d'Alon Bodner : www.likeafish.biz

L'ivresse des bulles

A. Prosperetti, *Bubbles*, in *Physics of Fluids*, vol. 16, pp. 1852-1865, 2004.

G. Mougin et J. Magnaudet, *Path instability of a rising bubble*, in *Physical Review Letters*, vol. 88, article 014502, 2002.

Clac végétal et uppercut de crevettes

Y. Forterre et al., *How the Venus flytrap snaps*, in *Nature*, vol. 433, pp. 421-425, 2005.

S. N. Patek et al., *Deadly strike mechanism of a mantis shrimp*, in *Nature*, vol. 428, pp. 819-820, 2004.

Le pop-corn, c'est emballant

H.G. Schwartzberg et al., *Modelling deformation and flow during vapor-induced puffing*, in *J. Food Engineering*, vol. 25, n° 3, pp. 329-372, 1995.

CHAPITRE II - EST-CE BIEN SOLIDE ?

Pont de Tacoma : la contre-enquête

D. Green et W. G. Unruh, *The failure of the Tacoma bridge: a physical model*, in *American Journal of Physics*, vol. 74, n° 8, pp. 706-716, 2006.

Y. K. Billah et R. H. Scanlan, *Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks*, in *American Journal of Physics*, vol. 59, n° 2, pp. 118-124, 1991.

Des tours qui chavirent

Y. Fujino et al., *Structural control: basic concepts and applications*, in *Proceedings of the 1996 ASCE Structures Congress*, Chicago, Illinois, 15-18 avril 1996.

T. Haskett et al., *Tuned mass dampers under excessive structural excitation* : www.motioneering.ca/User/Doc/1273.pdf.

Accéléromètres en mission

D. Green et W. G. Unruh, *The failure of the Tacoma bridge: a physical model*, in *American Journal of Physics*, vol. 74, n° 8, pp. 706-716, 2006.

Des chocs amortis... en toute sécurité

N. Bogduk et N. Yoganandan, *Biomechanics of the cervical spine*, Part. 3: *Minor injuries*, *Clinical Biomechanics*, vol. 16, pp. 267-275, 2001.

Informations techniques sur les tests de l'Association Euro NCAP : <http://www.euroncap.com/tests.aspx>
<http://www.crash-test.org/>

Jeux de boules creuses ou pleines

Fédération française de pétanque et de jeu provençal : <http://www.petanque.fr/>

Fédération française du sport de boules : <http://www.ffsb.fr/>

Une énergie à tout casser

A. Refahi et al., *Use of rock mechanical properties to predict the Bond crushing index*, in *Minerals Engineering*, vol. 20, n° 7, pp. 662-669, 2007.

CHAPITRE III - COUP DE FROID OU COUP DE CHAUD ?

Vapeurs sous pression

E. Hecht, *Physique*, De Boek, 1998.

P. Papon et J. Leblond, *Thermodynamique des états de la matière*, Hermann, 1997.

L'air comprimé revient

H. Ibrahim et al., *Energy storage systems – Characteristics and comparisons*, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.

S. Lemoufouet-Gatsi, *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*, Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.

Un verre de rosée ou de brouillard ?

D. Beysens, *Dew nucleation and growth*, in *Comptes Rendus Physique*, vol. 7, pp. 1082-1100, 2006.

P. Cereceda, *Advective, orographic and radiation fog in the Tarapacá region, Chile*, in *Atmospheric Research*, vol. 64, pp. 261-271, 2002.

Les chauffeferettes chimiques

M. A. Rogerson et S. S. S. Cardoso, *Solidification in heat packs - I. Nucleation rate; II. Role of cavitation; III. Metallic Trigger*, in *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 49, pp. 505-529, 2003.

Quand le verre s'écoule

E. D. Zanotto, *Do cathedral glass flow?*, in *American Journal of Physics*, vol. 66, pp. 392-395, 1998.

R. Edgeworth et al., *The pitch drop experiment*, in *European Journal of Physics*, vol. 5, pp. 198-200, 2004.

Coup de froid sur le chaud

M. Jeng, *The Mpemba effect: When can hot water freeze faster than cold?*, à paraître dans *American Journal of Physics*, 2006.

J. Walker, *Hot water freezes faster than cold water. Why does it do so?*, in *Scientific American*, pp. 246-257, septembre 1977.

Ni trop chaud ni trop froid

M. Aguilera-Arzo et al., *Heat loss and hypothermia in free diving: estimation of survival time under water*, in *American Journal of Physics*, vol. 71(4), pp. 333-337, 2003.

M. Tipton et al., *Immersion deaths and deterioration in*

swimming performance in cold water, in *The Lancet*, vol. 354, pp. 626-629, 1999.

CHAPITRE IV - TROIS PETITES NOTES DE MUSIQUE

Quand le son devient glaçant

G. W. Swift, *Thermoacoustic engines and refrigerators*, in *Physics Today*, pp. 22-28, juillet 1995.

G. W. Swift, *Thermoacoustic engines*, in *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 84, pp. 1145-1180, 1988.

Bien reçu, bien entendu

R. Beyer, *Sounds of our times*, AIP Press/Springer-Verlag, 1998.

Sur un air de flûte

N. H. Fletcher et Th. D. Rossing, *The physics of musical instruments* (2^e édition), Springer, 1998.

D. E. Hall, *Musical acoustics* (2^e édition), Brooks/Cole Publishing, 1991.

Le profil des instruments à vent

I. Johnston, *Measured tones: the interplay of physics and musics*, Taylor & Francis, 2^e édition, 2002.

Les instruments de l'orchestre, collection Bibliothèque scientifique, Belin-Pour la Science, 1995.

Le didgeridoo, un tuyau chantant

N. H. Fletcher *et al.*, *Vocal tract resonances and the sound of the Australian didgeridu*: I, II et III, in *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, n° 2, pp. 1194-1204 et pp. 1205-1213, 2006; vol. 121, n° 1, pp. 547-558, 2007.

N. Amir, *Some insight into the acoustics of the didgeridu*, in *Applied Acoustics*, vol. 65, pp. 1181-1196, 2004.

www.phys.unsw.edu.au/jw/didgeridu.html

CHAPITRE V - DU CÔTÉ DES ONDES

Les retours de l'homme invisible

S. Tachi, *Telexistence and retro-reflective projection technology (RPT)*, in *Proceedings of the 5th Virtual Reality International Conference (VRIC 2003)*, pp. 69/1-69/9, 2003.
<http://projects.star.t.u-tokyo.ac.jp/projects/MEDIA/xv/oc.html>

Radio FM ou radio AM ?

P. Lecoy, *Principes et technologies des télécoms*, Hermès-Lavoisier, 2005.

Les étiquettes électroniques

Klaus Finkenzeller, *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*, John Wiley & Sons, 2003.

À la chaleur des micro-ondes

M. Vollmer, *Physics of the microwave oven*, in *Physics Education*, vol. 39, pp. 74-81, 2004.

J. M. Osepchuk, *A history of microwave heating applications*, in *IEEE Trans. MTT*, vol. 32, n° 9, pp. 1200-1224, 1984.

Des lignes à courant continu ou alternatif ?

L. Ruby, *Why DC for long-range power transmission*, *The Physics Teacher*, vol. 40, n° 5, pp. 272-274, 2002.

Th. Wildi et G. Sybille, *Électrotechnique*, De Boeck Université (4^e édition), 2005.

CHAPITRE VI - UN PEU DE CULTURE PHYSIQUE

Marcher comme un athlète

H. Geyer *et al.*, *Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running*, in *Proc. R. Soc. B*, vol. 273, pp. 2861-2867, 2006.

A. J. Raynora *et al.*, *Are transitions in human gait determined by mechanical, kinetic or energetic factors ?*, in *Human Movement Science*, vol. 21, pp. 785-805, 2002.

Le trébuchet du footballeur

A. Lees et L. Nolan, *The biomechanics of soccer: a review*, in *Journal of Sports Sciences*, vol. 16, pp. 211-234, 1998.

Le vol de l'ovale

P. J. Brancazio, *Rigid-body dynamics of a football*, in *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 5, pp. 415-420, 1987.

Tirés par le vent

P. J. Richards, A. Johnson et A. Stanton, *America's Cup downwind sails: vertical wings or horizontal parachutes ?*, in *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, pp. 1565-1577, 2001.

P. J. Richards, *The effect of wind profile and twist on downwind sail performance*, in *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 67&68, pp. 313-321, 1997.

Dans le sillage des navires

J. Lighthill, *Waves in fluids*, Cambridge University Press (2^e édition), 2001.

Marcher sur l'eau ? Pas de lézard !

S. T. Hsieh et G. V. Lauder, *Running on water: Three-dimensional force generation by basilisk lizards*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, n° 48, pp. 16784-16788, 2004.

J. W. Glasheen et T. A. McMahon, *Vertical water entry of disks at low Froude numbers*, in *Phys. Fluids*, vol. 8, n° 8, pp. 2078-2083, 1996.

<http://nanolab.me.cmu.edu/projects/waterrunner/>

INDEX DES OBJETS

A

accéléromètre 32
aile 18
airbag 40, 44
ARVA 118
autocuiseur 58
avion 18, 110, 144, 148

B

basilic 152
BLU 114
boules 48
brouillard 66

C

canalisations 78
catadioptrés 110
catapulte 136
chars 144
chaufferette chimique 70, 82
cire 70
clairon 100
clarinette 100
conduit vocal 104
cordes 36
course 132
crevette Mante 22

D

didgeridoo 104
dionée 22

E

étiquettes RFID 118

F

flûte 96, 100
football 136
four à micro-ondes 122

G

geyser 58
goudron 74

H

hypothermie 82

L

lignes électriques 126

M

marche 132, 152
membrane basilaire 92
Mentos 10
meule, broyeurs, concasseurs 44

N

navires 148

O

octave 92, 100
oreille 92
orgue 96
osselets 92

P

pass *Navigo* 118
pendule 36, 132, 136
plongée 14, 82
pluies verglaçantes 70
polystyrène expansé 26
pont 32
pop-corn 26

R

radar 110
RECCO 118
réfrigérateurs 88
rosée 66
rugby 140

S

saxophone 100
serres 66

T

toupie 140
tours 36
tramway 32
trébuchet 136
trombone 104
trompette 100
tube 88, 96, 100, 104
turbine à gaz 62
tympa 92

V

vagues 148
vent 32, 36, 144
vitraux 74
voile 144

W

wiimote 40

Y

yeux de chat 110

INDEX DES CONCEPTS

- A**
- absorption 110, 122
 - accélération 22, 36, 40, 44, 48
 - accélération de la pesanteur 132, 152
 - aller-retour 96, 100, 104
 - amortissement, dissipation 26, 36, 40, 44, 126
 - amplification 88, 92, 96, 104
- B**
- bulles 10, 14, 18, 22, 26, 58
- C**
- cavitation 14, 22
 - choc 36, 40, 152
 - compression 62, 88
 - condensation 58, 66
 - convection 78, 82
- D**
- détente 62, 88
 - diffraction 114
 - dissolution 10, 14, 78
- E**
- ébullition 58
 - effet Joule 126
 - énergie 14, 52, 62, 66, 70
 - évaporation 26, 66, 78, 82
- F**
- force centrifuge 132, 136
 - fréquence 32, 36, 88, 92, 96, 100, 104, 122
 - frottement 18, 52, 140
- G**
- gaz carbonique 10, 14
 - germe, impuretés 58, 66, 70
- H**
- harmoniques 100, 104
 - humidité 26, 66
- I**
- induction 118, 122
 - instabilité 18, 22, 96
 - interférences 148
 - invisibilité, transparence 110
- L**
- leviers 22, 92
- M**
- modulation 114
 - moment cinétique 136, 140
- N**
- nucléation 10, 70
- O**
- ondes électromagnétiques 110, 114, 118, 122
 - oscillations 32, 36, 92, 140
 - osmose 22
- P**
- portance 18, 144
 - poussée d'Archimède 18
 - pression 14, 26, 58, 62, 88, 92, 96, 104, 152
 - principe d'équivalence 40
 - puissance 18, 62, 66, 82, 92, 96, 114, 152
- R**
- raisonnement microscopique 10, 14, 52, 58, 62, 70, 74, 122
 - rayonnement 66, 110, 118
 - réflexion 110, 122
 - réfraction 110
 - résonance 32, 36, 88, 92, 96, 104, 118, 122
- S**
- sillage 18, 140, 148
 - solidification 26, 70
 - son 88, 92, 96, 100, 104, 114, 148
 - spectre 100, 104, 114
 - surfusion 70, 78
- T**
- température 26, 58, 62, 66, 70, 74, 78, 82, 88
 - tension superficielle 10, 152
 - tourbillons 18, 32, 96
 - traînée 140, 144, 152
- V**
- vibrations 32, 36, 88, 92, 96, 100, 104
 - viscosité 74
 - vitesse 40, 48, 132, 136, 144



Imprimé en France par Clerc à Saint-Amand-Montrond
N° d'édition : 075105-01 - N° d'imprimeur : 10083
Dépôt légal : mars 2010

La physique buissonnière

Une plante plus rapide qu'une mouche, un footballeur qui s'inspire d'un engin de guerre du Moyen Âge, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour quiconque veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de tout, J.-M. Courty et É. Kierlik vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules.

Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène physique que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik, professeurs à l'Université Pierre et Marie Curie, tiennent la rubrique « Idées de physique » de la revue *Pour la Science*. Ils ont reçu en 2008 pour ces chroniques le prix Jean Perrin de Popularisation de la science de la Société française de physique.

Ils sont auteurs des ouvrages *Le monde a ses raisons* et *Les lois du monde* (avec Roland Lehoucq) parus aux éditions Belin-Pour la Science.

Jean-Michel Courty effectue ses recherches au Laboratoire Kastler Brossel, une unité mixte de l'École normale supérieure, de l'Université Pierre et Marie Curie et du Centre national de la recherche scientifique. Il est chargé de mission pour la communication scientifique à l'INP/CNRS (Institut de physique).

Édouard Kierlik effectue ses recherches au Laboratoire de physique théorique de la matière condensée, une unité mixte de l'Université Pierre et Marie Curie et du Centre national de la recherche scientifique. Il est directeur du Département de formation de la licence de physique de l'UPMC.

www.pourlascience.fr

ISBN 978-2-84245-105-9



9 782842 451059

075105

22 €