Nicolas CONSTANS François GRANER

COMMENT DEVENIR INVISIBLE ?

... et autres expériences à faire chez soi

DUNOD La Recherche

Table des matières

Le rond dans l'évier 1
Le Soleil en allume-feu 5
Tournez, tournez l'escarpolette 9
Le vide thermos 13
L'aplomb de la petite reine 17
Une petite mousse qui monte 21
Laissez parler l'papier froissé 25
Matins caustiques 29
Le glouglou du goulot 33
Soufflez et jouez 37
Histoire d'œufs 41
Voiliers démontés 45
L'œil chevelu 49
Carrelé de craquelures 53
L'homme invisible 57
Lueur sucrée 61
Un biscuit bien imbibé 65
Touillez la fécule 69
Fard à bosses 73
Brisons le sucre glace 77
Laissons tomber les tartines 81
Les dominos tombent pile 85
Sous le signe de l'hexagone 89
Caries et coquilles 93
Des hologrammes de pointe 97
Le V des vagues 101

Lacets vaches 105
Pompé par la vis 109
Geyser en bouteille 113
Gracieuses volutes 117
Embouteiller les nuages 121
Antibulles et gouttes flottantes 125
Reflet sous pression 129
Des petits trous 133
Du carré dans les pirouettes 137
Le shampooing et ses écarts 141
Le thé boit la tasse 145
Les gammes du café 149
Les yeux dans le pastis 153
L'eau serpentine 157
La spirale des anneaux 161
La chandelle et son lustre 165
Ça bulle dans le fond 169
Ruban à frisettes 173
Soufflez, aspirez 177
Des ronds sous l'eau 181
Déchiré avec des dents 185
Entre deux eaux 189
Un tube planant 193
La mousse plate 197
Foncé tout imbibé 201
Le quadrille de lait 205
Le sifflet à tourbillon 209
La samba du tuyau 213
Le rond des sables 217
Mirage salé 220
Petits plops et gros ploufs 224
Références 227
Pour en savoir plus 232
Index 234

Le rond dans l'évier

Léonard de Vinci, dans l'un des 13 000 feuillets où il consignait infatigablement ses observations sur la nature, notait : « L'eau qui tombe en ligne perpendiculaire par un tuyau arrondi sur un lieu plan, tracera une onde circulaire autour de l'endroit percuté ; à l'intérieur de ce cercle, l'eau se mouvra très rapidement et s'étalera en une couche fort mince autour du point frappé, puis finira par heurter la vague qu'elle a produite qui cherche à retourner au lieu de la percussion. »

Imitez Léonard dans votre évier : ouvrez le robinet et observez.

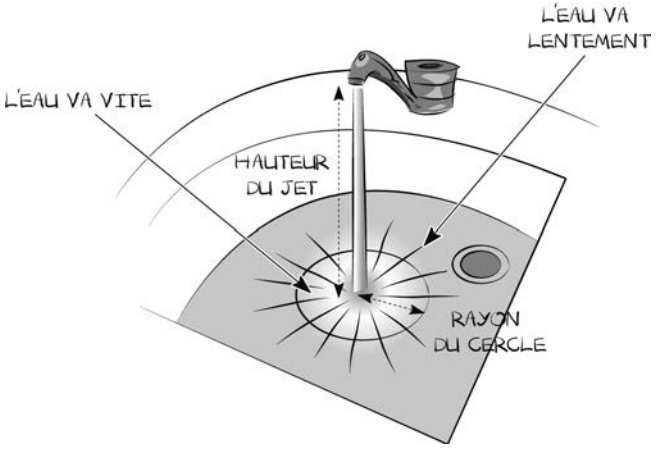
L'eau s'étale en une mince pellicule dans toutes les directions autour de l'impact. Puis son niveau remonte assez brusquement. Cette discontinuité trace un cercle autour du jet, que les physiciens nomment ressaut hydraulique. Bien sûr, si le fond de votre évier n'est pas plat, le cercle ne sera pas parfait.

La vague de Léonard

Faites l'expérience dans un moule à tarte. Que se passe-t-il ? Puis retournez le moule. Qu'observez-vous maintenant ?

Dans le moule, le cercle rapetisse au fur et à mesure du remplissage, car l'eau ne peut plus se vider, donc son niveau

augmente à l'extérieur du rond. À moins de percer un trou dans votre moule, votre ressaut disparaît rapidement. Quand le moule est retourné, en revanche, le niveau n'est plus contraint, donc la discontinuité est à peine visible. Mais revenons à Léonard. Sur la couche mince, écrit-il, l'eau se meut très rapidement.



Jetez quelques miettes près du jet. Pouvez-vous estimer leur vitesse avant et après le cercle ?

Pas de doute : les miettes vont vite sur la couche mince, puis ralentissent après la discontinuité. Que se passe-t-il sur la couche mince ? L'eau passe d'une surface étroite (celle du tuyau) à une surface de plus en plus grande (celle du jet qui s'étale dans toutes les directions, en forme, disons, de pavillon de trompette). Le débit, la vitesse du fluide multiplié par la surface qu'il traverse, reste constant. Par conséquent, si la surface augmente, la vitesse doit diminuer. Tant et si bien, proposa Lord Rayleigh en 1914, qu'elle finit par atteindre une vitesse critique. Et c'est à cet endroit, selon lui, que le ressaut se forme.

Quelle est l'idée de Rayleigh ? Peu ou prou celle du mur du son. Le frottement de l'air sur un avion produit des ondes sonores. Si l'appareil atteint la même vitesse que ces ondes, elles s'accumulent à son nez, et créent une discontinuité de pression. Le phénomène existe également si c'est l'air qui va à une vitesse supersonique, l'avion ou un autre obstacle étant fixe. Ainsi dans un vent supersonique, comme celui d'une soufflerie, il suffit d'une petite perturbation ou d'une impureté pour que des ondes sonores soient générées, qu'elles s'accumulent et créent une discontinuité. C'est un processus analogue qui est à l'œuvre dans le ressaut hydraulique, à la différence que le rôle des ondes sonores est tenu par des ondes de surface.

L'eau qui frotte épaissit

Sur la couche mince, créez un obstacle avec la pointe d'un clou ou d'un crayon. Qu'observez-vous ?

Le sillage ainsi créé prend la forme d'un triangle : c'est exactement la même structure – une onde de choc, en fait – que l'on observe à l'avant d'un avion qui passe le mur du son : cela semble aller dans le sens de l'explication de Rayleigh. Le problème est que cette théorie ne permet pas de reproduire précisément les résultats expérimentaux, notamment la variation du rayon avec le débit.

Cependant, il y a un paramètre que Rayleigh ne fait pas jouer dans sa formule, la viscosité.

Quelle taille a le rond quand vous versez de l'huile à la place de l'eau ?

Il est à peine visible : expérimentalement, en effet, le rayon est d'autant plus petit que le fluide est visqueux. En 1964, E.J. Watson, de l'université de Manchester, montre que dans la zone où le fluide frotte sur la paroi, la couche limite, les effets visqueux ne sont pas du tout négligeables. Et plus le

fluide s'éloigne de l'impact, plus il a subi de frottements, donc plus cette couche limite est épaisse. Certains, comme Robert Godwin, du laboratoire de Los Alamos, proposent donc simplement de situer la discontinuité à l'endroit où cette couche limite, à force d'épaissir, atteint la surface. Les prédictions sont un peu meilleures, mais on ne sait pas justifier une telle hypothèse.

Afin de distinguer les effets visqueux et ceux de type Rayleigh, des physiciens de l'École normale supérieure et du Washington and Jefferson College ont effectué une expérience avec un liquide de viscosité quasi nulle, l'hélium superfluide : le rond est toujours présent. C'est donc finalement l'explication traditionnelle de Rayleigh qui semble s'imposer[1]. La viscosité doit cependant être prise en compte dans les liquides comme l'eau pour reproduire les résultats expérimentaux.

MATIÈRE À EXPÉRIENCES

Dans la théorie de Rayleigh, le rayon du cercle est proportionnel : au débit divisé par le carré de la hauteur du jet — à petit débit —, et au carré du débit divisé par le carré de la hauteur du jet — à haut débit. Pour Godwin, le rayon du cercle est proportionnel au débit à la puissance deux tiers et inversement proportionnel à la racine cubique de la viscosité. Avec un verre gradué, une montre et une règle, mesurez le débit de votre robinet et le rayon du cercle. Quelle relation entre les deux obtenez-vous ? Votre évier est-il plutôt Godwin ou plutôt Rayleigh ?

L'homme invisible

Comment se rendre invisible ? Dans son livre *L'Homme invisible*, publié en 1897, Herbert George Wells fournit une explication[28]. Le personnage central, Griffin, ancien étudiant en chimie, expose avec exaltation à son ancien condisciple Kemp comment il a acquis cette surprenante faculté. Il explique : « Si vous plongez dans l'eau une plaque de verre […], elle disparaît presque complètement, parce que le rayon qui passe de l'eau dans le verre n'est que légèrement réfracté ou réfléchi, c'est-à-dire modifié dans sa direction. » Puis il passe au cas où le verre a une forme plus complexe qu'une plaque, quand il est en poudre.

Limez un morceau de verre ou de plexiglas (le corps transparent d'un stylo à bille par exemple). Voyez-vous la poudre obtenue ?

« Elle devient beaucoup plus facile à voir dans l'air ; elle devient, du moins, une poudre opaque et blanche. Ceci, parce que la pulvérisation multiplie les surfaces sur lesquelles s'exercent réflexion et réfraction. […] La lumière est réfractée ou réfléchie par chacun des grains qu'elle traverse, et très peu de rayons passent droit. » De même, si les nuages sont blancs, c'est parce qu'ils sont de la « poudre d'eau ».

Placez la poudre dans un verre d'eau : la voyez-vous toujours ?

« [...] Ce verre blanc pulvérisé, si vous le mettez dans l'eau, sur-le-champ, il cesse d'être visible. C'est que le verre pulvérisé et l'eau ont à peu près le même indice de

réfraction : c'est-à-dire que la lumière subit à peine une petite réflexion ou réfraction en passant de l'un à l'autre. »

Un homme, ce n'est pas du verre pilé

La réfraction, c'est la déviation des rayons lumineux quand ils passent d'un milieu où ils se propagent lentement à un autre où ils se propagent plus vite, ou l'inverse. La vitesse de la lumière dans chaque milieu se caractérise par un indice de réfraction, dont le rapport détermine la déviation. Celui de l'eau est environ 1,33 et celui de l'air à peu près 1. Voilà pourquoi l'image d'une cuillère dans un verre d'eau nous semble brisée au niveau de la surface, car la lumière est réfractée en passant de l'eau à l'air.

« Oui, sans doute. Mais un homme, ce n'est pas du verre pilé !

– Non, en effet, c'est bien plus transparent !

– Allons donc ! »

« Huilez du papier blanc. » Qu'observez-vous ?

On peut voir à travers. Car « le papier est fait de fibres transparentes : s'il est blanc et opaque, c'est pour la même raison que le verre pulvérisé est opaque et blanc ! […] Mais cela n'est pas vrai seulement du papier, mais des fibres du coton, du lin, de la laine, du bois, aussi des os, Kemp, de la chair, Kemp, des cheveux, Kemp, des ongles et des muscles, Kemp ! En réalité, l'organisme tout entier d'un homme – à l'exception des cellules rouges de son sang et des pigments foncés de ses cheveux – est fait de tissu transparent incolore. »

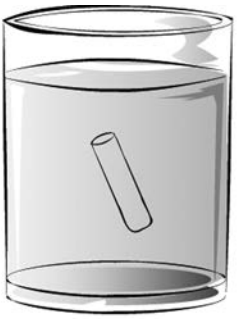
Justement, Griffin a découvert une substance qui décolore le sang et il est albinos, bref il peut être invisible.

Dans la réalité, n'en déplaise à Griffin, un homme invisible ne peut exister. Notamment parce que les os, même s'ils sont faits

pour un tiers de collagène, le constituant principal de la peau, sont principalement minéraux, donc ne sont pas transparents.

Remplissez d'eau un petit tube en verre, par exemple un échantillon de parfum. Plongez-le dans un verre d'eau, que vous placerez entre vous et une lampe. Qu'observez-vous ?

L'intérieur du tube est quasi indiscernable du fond. Son contour, en revanche, reste visible. Pour le faire disparaître, il faudrait que les indices de l'eau et du verre soient très proches. De la même manière, on voit difficilement comment Griffin peut rendre l'indice des tissus du corps humain (environ 1,5) égal à celui de l'air[29].



Le hamster invisible

Une technique fondée sur ce principe existe toutefois, mais elle est réservée aux corps morts. Élaborée en 1911 par l'anatomiste allemand Werner Spalteholz, elle consiste à décolorer le corps ou l'organe à étudier – éventuellement à en déminéraliser les os –, puis à le plonger dans une substance d'indice 1,5, le rendant ainsi transparent[30]. Récemment, une équipe de l'université du Texas a fait de même pour la peau de hamsters vivants, par l'ajout de glycérol d'indice proche du collagène, ce qui a permis de visualiser leur réseau sanguin[31].

L'homme invisible aurait plus de chance de passer inaperçu s'il vivait dans l'eau, comme les méduses qui se camouflent grâce à cette propriété. Avoir des tissus du même indice de réfraction que l'eau est en effet bien plus facile que pour l'air, d'autant qu'ils sont déjà constitués d'eau à plus de 95 %. Il lui resterait toutefois à régler un problème de vue.

Mettez votre visage sous l'eau et lisez une inscription, sur un emballage par exemple. Qu'observez-vous ?

C'est flou. Pour faire le point, l'œil a une sorte de loupe, le cristallin. L'eau et le cristallin ont des indices proches, donc la réfraction est faible. Mais une loupe ne peut fonctionner sans réfracter : c'est ce qui focalise tous les rayons lumineux vers le même point. Voilà pourquoi on voit très mal sous l'eau, pourquoi le regard se brouille quand on pleure, ou pourquoi l'homme invisible, dont le cristallin aurait le même indice que l'air, serait aveugle. Un inconvénient qu'une tribu de pêcheurs sous-marins thaïlandais, les Moken, compense en accommodant fortement, c'est-à-dire en comprimant le cristallin pour augmenter la réfraction[32].

Les organismes marins transparents ne sont cependant pas aveugles, car ils ne sont pas totalement transparents. Leur rétine, pour détecter la lumière, doit l'arrêter, donc ne pas être transparente. Le plus souvent, elle est placée au bout de longues protubérances, et semble ainsi ne pas appartenir au corps principal.

MATIÈRE À EXPÉRIENCES

Reprenons l'expérience avec le tube en verre. Au lieu de l'eau, utilisez de l'huile de vidange. Ajoutez-y, par tâtonnements, un peu d'huile végétale, et essayez de faire disparaître le tube.

Le thé boit la tasse

« Accoudée à la table, elle remuait sa cuillère dans sa tasse, et cédait puérilement au bien-être de la minute présente. »[104] Depuis plus d'un siècle, d'autres buveurs que ce personnage de Roger Martin du Gard, préfèrent occuper cette minute à une fiévreuse interrogation : pourquoi, lorsqu'on remue le thé, les feuilles se concentrent-elles au centre du fond de la tasse et non en périphérie ? Plusieurs hypothèses ont été proposées, mais rien ne vaut quelques expériences pour trancher…

Thé dansant

Dans une tasse à fond plat, mettez des feuilles de thé qui ne flottent pas, ou des grains de sable. Mélangez avec une cuillère, et retirez-la. Que constatez-vous ?

Effectivement, les feuilles se rassemblent au centre du fond de la tasse. Pourquoi ? Une première hypothèse souvent avancée est que les feuilles de thé sont aspirées au centre par un tourbillon créé par la cuillère. En effet, la pression à l'intérieur de ce dernier est moindre qu'à l'extérieur, d'où une attraction. Est-ce le cas ?

Dans le bouchon d'une bouteille d'eau en plastique vide, faites un trou large d'un centimètre. Remplissez-la d'eau et introduisez-y des grains de sable et des petits morceaux de polystyrène. Goulot en bas, faites-lui décrire énergiquement des

petits cercles horizontaux, de façon à faire tourner l'eau. Qu'observez-vous ?

La bouteille se vide. À l'intérieur, un tourbillon d'air se crée dans l'eau, comme une tornade. Rapidement, si des bulles ne le perturbent pas, les grains de polystyrène sont aspirés vers lui. Les grains de sable, eux, spiralent lentement en périphérie. Pourquoi cette différence ?

Quand quelque chose tourne, une force centrifuge apparaît, qui le pousse vers l'extérieur. Elle est insuffisante pour empêcher l'eau d'être attirée vers le centre. Mais elle est proportionnelle à la masse – une fronde se tend plus facilement avec une pierre lourde. Comme le polystyrène est moins dense que l'eau, la force centrifuge est encore plus petite que s'il s'agissait de ce liquide : il est lui aussi attiré vers le centre. En revanche, le sable est nettement plus dense que l'eau : la force centrifuge l'emporte. C'est le cas aussi des feuilles de thé. Le tourbillon a donc l'effet inverse : il expulse les feuilles de thé vers la périphérie.

Des anneaux empilés

La seconde hypothèse est basée sur l'« instabilité de Taylor-Couette » : quand on fait tourner un cylindre à l'intérieur d'un autre, avec du liquide entre les deux, des courants en forme d'anneaux se créent, empilés autour du cylindre central. Ce serait l'un d'eux, présent dans la tasse, qui ramènerait les feuilles au centre. Mais, d'une part, de tels anneaux devraient être perturbés par la présence du fond ; d'autre part, ils tournent soit dans un sens, soit dans l'autre : une partie des feuilles devrait donc être expulsée en périphérie par certains rouleaux, ce qui n'est pas le cas.

Si ce n'est ni un tourbillon, ni un anneau de Taylor-Couette, qu'est-ce qui amène les feuilles au centre ?

Observez la surface de la tasse quand vous tournez, en lumière rasante. Quelle est sa forme ?

Elle s'incurve vers le haut plus on s'éloigne du centre. Elle reste à peu près stable si la cuillère tourne à une vitesse constante. Pourquoi ?

La force centrifuge pousse le liquide vers les bords : le niveau s'y élève. Un point en périphérie supporte donc un poids d'eau plus grand, donc une pression plus élevée qu'un autre plus près du centre, à la même hauteur. La pression que subit un volume de fluide est donc toujours plus forte côté périphérie que côté centre : la différence des deux tend à le ramener vers le centre. La pression a donc une action opposée à la force centrifuge : le niveau du fluide s'établit là où elles s'équilibrent. Mais pas partout. Car au fond de la tasse le liquide frotte, donc tourne moins vite. Par conséquent, comme l'écrit Albert Einstein, qui a relaté cette expérience dans un article de 1926, « la force centrifuge [sera plus petite] près du fond qu'au-dessus »[105]. Donc au fond la différence de pression domine, et ramène le liquide vers le centre.

Cela crée un courant au fond de la tasse, qui est contraint de faire une boucle puisque le récipient est fermé. Du centre il

monte vers la seule issue, le haut, puis va vers les bords, redescend au fond, et va vers le centre. Combiné avec la rotation du liquide, il fait spiraler vers le centre les feuilles de thé, trop lourdes ensuite pour monter.

MATIÈRE À EXPÉRIENCES

Dans son article, Einstein utilise la tasse de thé comme analogie aux méandres[106] : quand une rivière tourne, le frottement dans son lit crée le même type de courant que dans la tasse, qui ramène les sédiments de l'extérieur vers l'intérieur du virage. Résultat : la courbe du méandre se creuse. Le vérifiez-vous, en laissant couler un filet d'eau du robinet sur un couvercle plan, légèrement incliné et recouvert de sable ?

La chandelle et son lustre

Michael Faraday, ancien apprenti relieur devenu l'un des plus célèbres physiciens et chimistes anglais du XIXe siècle, garda toute sa vie le goût de la manipulation concrète. C'est ce qu'il entreprit de transmettre à un jeune auditoire en 1860, lors de six conférences consacrées à la bougie, car « il n'y a pas de porte plus ouverte pour entrer dans l'étude de la philosophie naturelle »[120]. Suivons donc son exemple.

Tout, tout, tout, vous saurez tout sur la bougie

Allumez une bougie et observez la flamme. Quelles sont ses différentes couleurs ?

Il y a à peu près trois zones de couleurs différentes. La plus vaste, en haut, est opaque, brillante, plutôt jaune-blanc mais tirant vers le jaune-orangé à son sommet. À l'intérieur de celle-ci, la zone qui contient la mèche est quasi transparente et sombre. Enfin, du bleu est visible au bas de la flamme. D'où viennent ces couleurs ?

Maintenez la grille d'une passoire sur la flamme, près de la mèche. Que constatez-vous ?

La flamme ne traverse pas la grille. De la fumée – blanche, d'odeur un peu piquante – est produite, alors que la flamme n'en émettait pas.

Laissez un moment la passoire près de la mèche, puis enlevez-la. Qu'y voyez-vous ?

De la cire de bougie s'est déposée en surface. La fumée blanche est donc de la vapeur de cire. En effet, la bougie est d'abord liquéfiée par la chaleur de la flamme, monte par capillarité dans la mèche, puis est évaporée. La vapeur de cire obtenue brûle, c'est-à-dire réagit chimiquement avec l'oxygène – donnant lieu, au total, à plusieurs milliers de réactions – ce qui libère de la chaleur, qui évapore la cire, et ainsi de suite.

Placez maintenant la passoire dans la partie jaune-blanc de la flamme. Que se passe-t-il ?

La fumée est noire et monte droite, en un long tube.

En extérieur et sans l'enflammer, maintenez pendant quelques secondes un morceau de carton fort dans la flamme, d'abord un peu au-dessus de la mèche, puis vers le sommet. Qu'observez-vous ?

La fumée noire laisse un dépôt qui s'enlève avec le doigt. Sur le verso, le carton est roussi : quand il est près de la mèche, la

tache décrit à peu près un cercle ; près du sommet, plutôt un disque. Même chose pour le dépôt noir. Cela correspond, dans les deux cas, aux régions du carton en contact avec la partie jaune-blanc de la flamme. C'est là que la température est la plus haute, et que la majeure partie du dépôt noir se forme.

Cette zone est la plus chaude parce que la combustion y est la plus efficace. En effet, c'est sur les bords de la flamme que se rencontrent l'oxygène et la vapeur de cire, qui réagissent. La zone jaune-blanc n'est pas cependant restreinte à la périphérie : elle occupe toute la largeur de la flamme au niveau du sommet. Car plus la vapeur de cire s'élève au-dessus de la mèche, plus l'oxygène a eu le temps de la consumer et donc de progresser vers l'axe de la flamme. Voilà pourquoi celle-ci a une forme conique.

Boule de suie

Le dépôt noir, ce sont des suies, boules de carbone d'environ un centième de micromètre de diamètre. On connaît mal le détail de leur formation, mais on sait qu'une température de l'ordre de 1 500 °C et un excès de vapeur de bougie par rapport à l'oxygène sont nécessaires. Ces conditions sont atteintes dans la zone jaune-blanc. La couleur jaune vient de la combustion des suies, portées à incandescence : exactement comme un fer chauffé au rouge, elles émettent de la lumière – plutôt blanche à 1 500 °C au centre de la zone, et plutôt orange au sommet de celle-ci, à 700 °C. Si une bougie allumée ne fume pas, c'est parce qu'elle est formulée de façon à ce que la totalité des suies soient brûlées dans la flamme. La zone sombre, quant à elle, n'est pas lumineuse, car l'oxygène y arrive plus difficilement : la cire y brûle peu, et à une température assez faible pour qu'elle ne forme pas de suie.

Le bas de la flamme n'est pas jaune : là non plus, il n'y a pas de production de suie. En effet, à cet endroit, la vapeur de bougie n'est pas en excès par rapport à l'oxygène, car celui-ci y arrive en permanence par le mouvement de l'air environnant (l'air

chauffé monte). En outre, la zone est à 1 200 °C, trop peu pour former de la suie. La couleur dominante est plutôt bleue. Elle vient de la lumière émise lorsque deux paires d'atomes très instables – carbone-carbone et carbone-hydrogène, intervenant dans les réactions de combustion – se recombinent avec d'autres composés chimiques.

MATIÈRE À EXPÉRIENCES

Coiffez un briquet d'une passoire. Puis, appuyez sur le bouton pour en laisser s'échapper le gaz. De l'autre côté de la grille de la passoire, allumez le jet de gaz avec une bougie ou une allumette. Que constatez-vous ?

Nicolas CONSTANS • François GRANER

COMMENT DEVENIR INVISIBLE ?

... et autres expériences à faire chez soi

Avez-vous remarqué qu'un morceau de sucre brille quand on l'écrase ? Pourquoi, lorsque jetés à l'eau, des cailloux font « plouf » tandis que d'autres font « plop » ? Pourquoi certaines personnes ont-elles toujours les lacets défaits ?

Bien d'autres énigmes vous entourent. D'où vient ce glouglou lorsque vous versez de l'eau dans votre verre et pourquoi cela ne marche-t-il pas lorsque vous y versez de l'huile ? Pourquoi le sillage des bateaux est-il toujours le même, du lent paquebot voguant son train de sénateur au fringant hors-bord filant au vent ? Essayez avec un canard, et vous verrez…

Si ces questions titillent votre imagination, découvrez-en plus de cinquante autres dans ce livre : cinquante observations ou expériences toutes simples, à faire chez soi, pour débusquer la physique cachée jusque dans votre tasse de thé !

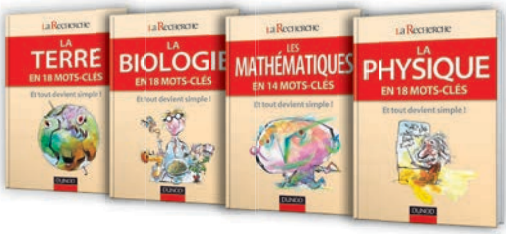
NICOLAS CONSTANS

Docteur en physique,
il est journaliste scientifique.

FRANÇOIS GRANER

Chercheur au CNRS,
ses recherches portent sur les liens entre la physique microscopique et le monde qui nous entoure.

Retrouvez également chez le même éditeur :



9 782100 546503

6687388
ISBN 978-2-10-054650-3

La Recherche

DUNOD
www.dunod.com