



## LA PHYSIQUE D'UNE GOUTTE D'EAU

### SÉANCE DU 13 MAI 2004

*Avec David Quéré, physicien, directeur de recherche au CNRS.  
Et Claudius Laburthe, ancien ingénieur d'essais Airbus (EADS)*

### SALLE DE CONFÉRENCE DE L'ESPACE CLÉMENT MAROT, CAHORS (46)

C'est au sein du centre de congrès de Cahors que se tenait cette huitième séance de l'Université des Lycéens, clôturant l'année scolaire 2003-2004. Trois lycées avaient répondu présents : Clément Marot et Gaston Monnerville de Cahors ainsi que le Lycée Jean Lurçat de Saint-Céré. Ce sont ainsi 200 élèves de seconde et de 1<sup>re</sup> S qui participaient à cette conférence-débat.

Tous nos remerciements à Alain Chartier, conseiller pour l'action culturelle auprès de l'Inspecteur d'Académie du Lot.

[www.agrobiosciences.org](http://www.agrobiosciences.org)





## L'UNIVERSITÉ DES LYCÉENS

# UNE EXPÉRIENCE PILOTE EN MIDI-PYRÉNÉES POUR METTRE LA SCIENCE EN CULTURE

*En France et en Europe, la régression des effectifs étudiants dans certaines filières scientifiques préoccupe les pouvoirs publics. Ce phénomène pose à moyen terme le problème du renouvellement des cadres scientifiques et techniques, des enseignants et des chercheurs. De plus, le désintérêt des jeunes à l'égard de la science risque de nuire au débat démocratique sur les choix d'orientation de la recherche et de ses applications. La revalorisation de la place de la science dans la cité est d'ailleurs l'une des priorités du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation et de la Recherche.*

### LA CONNAISSANCE ET LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CŒUR DES RAPPORTS ENTRE LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ

La Mission d'Animation des Agrobiosciences (MAA), créée dans le cadre du Contrat de Plan État-Région Midi-Pyrénées 2000-2006, a pour vocation, au plan régional et national, de favoriser l'information, les échanges et le débat entre la science et la société. Elle est à l'initiative de l'Université des Lycéens : une série de rencontres visant à rapprocher les chercheurs, les professionnels, les lycéens et leurs enseignants. Cette démarche destinée aux lycéens de Midi-Pyrénées, en 2003-2004, devrait à terme être transposée dans d'autres régions de France, voire d'Europe.

### UNE INITIATIVE POUR SENSIBILISER LES JEUNES À LA CULTURE SCIENTIFIQUE

Les principaux objectifs de l'Université des Lycéens sont :

- Incrire les sciences, les technologies et les techniques dans la culture générale afin de permettre aux jeunes de se forger un esprit critique,
- Redonner du sens aux savoirs scientifiques en montrant les passerelles existant entre les disciplines, les relations entre la science et le contexte socio-économique et culturel, ainsi que les liens entre les savoirs et les métiers,
- Incarner la science à travers l'exemple du parcours de scientifiques venus à la rencontre des élèves pour « raconter » la science et dialoguer.

### UNE QUESTION, UNE DISCIPLINE, UNE TRAJECTOIRE

- La découverte d'une discipline scientifique : chaque séance, animée par l'équipe de la MAA, fait intervenir un chercheur, le conférencier principal, qui explore un champ scientifique à travers sa trajectoire individuelle, mais aussi à travers l'histoire collective de sa discipline : les grands enjeux, les questionnements, les perspectives.
- La confrontation des approches et l'interdisciplinarité : en contrepoint du conférencier principal, un intervenant de discipline ou de secteur professionnel apporte son point de vue et réagit aux propos du chercheur.
- Un dialogue avec les lycéens : à l'issue de ces exposés, une heure est consacrée au débat entre les lycéens et les intervenants.

### UN ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUE DES CLASSES

- L'édition d'un dossier préparatoire permet aux enseignants de préparer le débat en amont : listes des ressources documentaires, biographies des intervenants, principaux points de repères sur les sujets...
- La diffusion du contenu des séances est assurée par la mise en ligne sur les sites de la MAA [www.agrobiosciences.org](http://www.agrobiosciences.org) et de ses partenaires, ainsi que par la diffusion d'un document écrit.

### UNE ÉVALUATION DES SÉANCES

La mise en place et la validation d'un protocole d'évaluation sont assurées par des chercheurs de l'équipe de recherche en didactique des sciences, à l'École Nationale de Formation Agronomique, auprès des lycéens : recueil de leurs réactions, appréhension des évolutions de leur opinion et de leur appropriation des connaissances.



LE SUJET

## « LA PHYSIQUE D'UNE GOUTTE D'EAU »

### NI VENTRUE, NI POINTUE

Non, la goutte d'eau n'est pas telle que nous la dessinons, de la forme des larmes. Toute ronde, elle lutte même pour rester sphérique quoi qu'il arrive, dans un nuage ou ailleurs. Une forme qui explique des forces étonnantes et qui a des conséquences essentielles sur le comportement des gouttes, lorsqu'elles tombent sur la surface de vos lunettes ou sur le pare-brise des voitures.

### JAMAIS PLUS DE 3 MILLIMÈTRES

Pourquoi les gouttes ne seraient-elles pas énormes ? Impossible : sur Terre, elles ne dépassent jamais 3 millimètres de rayon. Au-delà, elles explosent... Là encore, des raisons très « physiques » expliquent ce phénomène, auquel échappent, en revanche, les grêlons. Heureusement : vu la fréquence des pluies violentes, moins rares que les averses de grêle, les dégâts provoqués seraient considérables...

### LA MORT DES ESSUIE-GLACES ?

La goutte frappant une vitre ou imbibant un matériau nous amène au cœur de la matière. Pouvons-nous tirer de ces observations des applications qui révolutionneraient la vie de tous les jours ? Par exemple, des pare-brise qui pourraient se passer d'essuie-glaces, des bétons hydrophobes ou des verres de lunettes qui ne pourraient plus s'embuer...

### RISQUES DE GIVRAGE

L'enjeu de ces recherches prend encore une importance tout autre lorsqu'il s'agit d'éviter aux avions de s'alourdir de centaines de kilos de glace, qui cassent les antennes ou les moteurs.

Sans oublier une « simple » pluie qui, criblant l'avion lancé à 500 km/heure, assourdit le pilote et décape la peinture aussi efficacement qu'un karcher...



---

## DAVID QUÉRÉ

Ce jeune physicien est directeur de recherches au CNRS.

Il travaille au Laboratoire de physique de la matière condensée du Collège de France. Professeur Chargé de Cours en Physique à l'École Polytechnique, il est également conseiller scientifique chez Saint-Gobain, un groupe industriel spécialisé notamment dans la fabrication du verre. Ses recherches expérimentales portent sur l'hydrodynamique et la physico-chimie des surfaces (gouttes, bulles, films, morphogenèse, impacts).

Il est l'auteur d'une centaine d'articles, de deux livres (*Gouttes, bulles, perles et ondes* en 2002 avec Françoise Brochard-Wyart et Pierre-Gilles de Gennes et *Qu'est-ce qu'une goutte d'eau ?* aux Petites Pommes du Savoie, 2003), ainsi que de plus de 200 communications sur ces sujets.

---

---

### LA CONFÉRENCE

## LES ÉTRANGES PROPRIÉTÉS D'UNE GOUTTE D'EAU

*Blottie dans le nuage, chutant dans l'air ou tombant sur votre pare-brise, la goutte d'eau n'a pas forcément les comportements auxquels on s'attend. Dotée de propriétés étonnantes, sa forme, sa taille, sa façon de s'écouler ou de s'accrocher mobilisent les chercheurs pour mieux comprendre la façon dont elle naît et dont elle voyage, mais aussi pour inventer les matériaux de demain, capables de « repousser » totalement l'eau. Explications pleines de rebondissements avec David Quéré.*

### LE PÉTROLE ET LA MACHINE À LAVER...

La branche scientifique dans laquelle je travaille, et qui est un domaine où la France est très en pointe, a pour nom la physique de la matière molle. Elle est née à partir de préoccupations concrètes et à une date très récente : 1973. Cette année là, nous étions plongés dans la première grande crise pétrolière et de nombreux pays se sont soudain émus du fait que lorsqu'on extrayait le pétrole, environ la moitié du gisement restait sous terre. Une grande société pétrolière, Exxon, a alors décidé de lancer un programme de recherches pour récupérer ces ressources enfouies, jusque-là négligées. Une petite expérience permet de comprendre le problème. Prenons un petit tube, remplissons-le d'huile et soufflons de l'air dedans : c'est l'équivalent d'une roche remplie de pétrole et de la manière dont on procède pour l'extraire, en « appuyant » avec de l'air. Eh bien, on a beau souffler très fort, on constate qu'il reste toujours à peu près la moitié du liquide dans le tube. On peut alors tenter d'en comprendre les raisons en faisant de la méca-

nique des fluides. Mais Exxon a opté pour une démarche tout à fait différente. Cette société est partie du principe qu'il existait un autre procédé efficace que nous connaissons tous pour extraire l'huile d'un milieu poreux, c'est... la machine à laver ! En effet, si je mets un pull taché de matière grasse dans la machine à laver, il en ressortira tout propre. L'eau savonneuse a réussi à faire cette chose tout à fait extraordinaire qu'on tente d'obtenir dans l'industrie pétrolière.

Exxon s'est donc intéressé à l'analyse et la compréhension de la détergence : l'eau savonneuse, comment ça marche ? Et pourrait-on essayer d'extraire le pétrole avec cette méthode ? Une science est née ainsi, au croisement de la mécanique des fluides, de la physique et de la chimie ; mais aussi au croisement de la physique appliquée – résoudre des problèmes très concrets tels que l'extraction du pétrole – et de la physique fondamentale, puisqu'à partir du moment où je me demande « Comment marche une eau savonneuse ? », je me pose des questions de compréhension. Trente ans plus tard, ces questions ont permis non seulement de récupérer plus de pétrole mais ont également débouché sur de nombreuses inventions qui n'étaient pas du tout prévues au départ, par exemple la mise au point de nouvelles familles de produits cosmétiques. C'est là l'une des particularités de cette science, toujours vraie aujourd'hui : on passe sans arrêt de problèmes très pratiques à des questions fondamentales ; non seulement on cherche des solutions, mais on fait avancer aussi la connaissance.



## COMME LES PINGOUINS SUR LA BANQUISE

Le sujet dont je vais vous parler aujourd'hui est caractéristique de ce va-et-vient. Une goutte d'eau est un petit objet familier, visible à l'œil nu, mais qui pose un certain nombre de questions. Curieusement, certaines d'entre elles peuvent rester sans réponse, même si elles sont très simples. D'autres relèvent de mathématiques assez poussées. Et quelques-unes, enfin, sont des questions pratiques qui débouchent sur des innovations technologiques.

La première chose qui caractérise une goutte d'eau et qui va se révéler très importante pour nous, c'est qu'elle définit une frontière entre l'eau intérieure à la goutte et l'air extérieur. Imaginez cette frontière comme un trait. Sous ce trait, qui représente la surface, il y a le liquide. Et au-dessus du trait, l'air. Sur cette surface, va se jouer quelque chose de très particulier. Qu'est-ce qu'un liquide ? C'est quelque chose de lourd - quand on ramène six litres d'eau du supermarché, on a bien conscience de cela. Et lorsque la bouteille est vide, elle est nettement plus légère. Car l'air dans la bouteille pèse 1 000 fois moins que l'eau. Si l'eau est si lourde, c'est parce que les molécules qui la composent, et c'est vrai pour tous les liquides et les solides, sont très proches les unes des autres. Elles s'attirent réciproquement. C'est ce phénomène qui donne sa cohésion aux liquides et aux solides. Du coup, on comprend que les molécules qui sont à la frontière avec l'air, sont « plus malheureuses » que celles qui se trouvent au milieu du volume d'eau, puisqu'elles cherchent à se mettre en contact avec leurs semblables, mais y parviennent moins bien. Ceci va engendrer une force, pour que la frontière soit la plus petite possible, de façon à limiter le nombre de molécules peuplant la surface. Or quelle est la surface la plus petite pour un volume donné ? C'est la sphère. Et donc très naturellement, une goutte ou son inverse, une bulle d'air dans l'eau, tendront à être sphériques.

Dans la nature, des êtres vivants obéissent aux mêmes principes : ce sont les pingouins sur la banquise. Lorsqu'il fait très froid, les pingouins se collent les uns aux autres pour se réchauffer mutuellement. Cela marche d'ailleurs très bien : des scientifiques ont mesuré la température qui règne au milieu du groupe : elle est de 30 °C ! Comme pour les molécules d'eau, une force pousse ces animaux les uns vers les autres et va donner à l'ensemble une cohésion. Et pour qu'il y ait le moins de pingouins possibles en contact direct avec le vent et le froid polaires, ils se regroupent en cercle. Exactement comme la goutte tend à être sphérique. On appelle cette force la « tension superficielle ».

## MÊME UNE GOUTTE QUI TOMBE RESTE RONDE

L'homme a pris conscience très tôt de ce phénomène. Il y a déjà 200 ans, de grands esprits comme le Français *Pierre Laplace*, l'Anglais *Thomas Young* ou *Goethe* en Allemagne, se sont demandés pourquoi les gouttes avaient une forme sphérique et ils ont compris que c'était lié, comme on l'a vu, à l'attraction mutuelle des

molécules entre elles. Goethe a ainsi écrit en 1807, deux ans après les idées de Laplace et Young, un roman intitulé *Les Affinités Électives*, où il met en scène ces théories. Au début du roman, trois personnages dialoguent. Le premier explique aux autres que l'eau, l'huile et le mercure, malgré leur grande différence, ont un point commun : ils résistent à la séparation, comme s'ils avaient un principe d'unité, une force qui les maintient en cohésion. Je peux évidemment séparer des gouttes d'une flaque, mais, dès que je cesse de les écarter, ces corps se rassemblent aussitôt. Arrive un personnage féminin, Charlotte, qui est en quelque sorte une expérimentatrice : dans notre enfance, dit-elle, nous nous amusions à séparer des bouts de mercure (vif-argent) en globules, pour les regarder ensuite se rassembler.

Enfin, un troisième personnage, le Capitaine, que nous pourrions appeler le « théoricien », en tire des conclusions : cette attraction entre les petits grains de matière qui constituent l'huile, l'eau, le mercure, rendue possible par la fluidité, se manifeste nettement et toujours par la forme sphérique. Et il ajoute une phrase assez surprenante, que j'appelle le « théorème de Goethe » et qu'on essaiera de démontrer : « La goutte d'eau qui tombe est ronde ». A priori, on se dit que c'est faux, à cause du mouvement. Nous savons tous, en effet, que l'air provoque une friction, et nous en déduisons que cette friction déforme la goutte. À partir de là, beaucoup d'expériences ont été menées au XIX<sup>e</sup> siècle, en particulier par le Belge *Joseph Plateau*. Des expériences qui ont été popularisées plus tard par un autre belge, Hergé, qui montre le capitaine Haddock, en route vers la Lune, donc en apesanteur, être frappé de stupeur devant du whisky échappé du verre et prenant une forme parfaitement sphérique.

## LES GOUTTES EXISTENT GRÂCE À LA POUSSIÈRE.

Ceci a un certain nombre de conséquences. Par exemple, si vous commencez à « empêcher » une goutte de prendre une forme ronde en l'étirant, pour lui faire prendre plutôt la forme d'une poire, vous vous doutez bien que dès que vous la laisserez tranquille, elle reviendra dans son état idéal, celui d'une sphère, comme sous l'effet d'un ressort. Cette force élastique c'est à dire la « tension superficielle ».

Imaginons une goutte qui tente de naître. Elle est alors évidemment très déformée, ce qui signifie qu'elle est le siège d'une pression énorme. Or, dans ce cas, elle doit exploser... Donc en théorie, une goutte ne peut pas naître. Ce que je viens de vous dire est strictement vrai. Et pourtant, des gouttes, nous en voyons tout le temps, ne serait-ce que la pluie qui tombe. Si les gouttes naissent quand même, c'est parce que l'eau parvient à se *condenser* sur de petites poussières qui font disparaître l'effet d'explosion. C'est également vrai pour les bulles d'air : si vous regardez un verre de boisson effervescente, vous remarquez que les bulles ne naissent pas dans le volume de liquide, mais toujours à la frontière du verre, donc en contact avec une surface solide, comme la poussière pour la goutte d'eau.

### L'ARME DE LA CREVETTE DU MEXIQUE : UNE BULLE !

Il existe néanmoins des cas très exceptionnels, pour faire naître des gouttes ou des bulles hors de tout autre matériau. C'est une équipe de chercheurs allemands et hollandais qui a trouvé la solution, il y a deux ans, à ce que j'appellerai le problème de « La Crevette du Golfe du Mexique ». Dans ce golfe, il existe une zone paradisiaque où les promoteurs immobiliers américains sont pourtant dans l'impossibilité de construire des stations balnéaires. Il y a là en effet une variété de crevettes qui fait un caquètement absolument insupportable, comme si vous étiez en permanence au milieu d'un très gros troupeau d'oies ! Les Américains ont cherché évidemment à comprendre comment ces crevettes parvenaient à faire un tel bruit et ont constaté qu'elles avaient une sorte de pince, qu'elles actionnent sans arrêt. Ils se sont donc dit que le bruit provenait du claquement de cette pince. Mais la raison est plus subtile que cela, comme l'ont découvert les chercheurs dont je vous parlais, et elle a à voir avec nos gouttes d'eau. La pince de cette crevette se ferme à une vitesse tout à fait extraordinaire et, ce faisant, fait partir un jet d'eau à 100 km/h. Or, comme nous l'apprend une loi de physique, qui s'appelle la loi de *Bernoulli*, quand un liquide va extraordinairement vite, il se trouve en très forte dépression. Dans notre cas, le jet à 100 km/h fait tomber la pression dans l'eau à -10 atmosphères. Au moment où cette pression chute très brutalement, une bulle apparaît. Celle-ci, qui est en dépression forte, se trouve expédiée très vite dans un milieu qui est, lui, à pression ordinaire. Ce milieu appuie donc sur elle et l'aplatit avec une violence extrême. Eh bien, le bruit provient tout simplement de l'explosion de cette petite bulle ! Et pour les crevettes, c'est une arme. Car l'effondrement de la bulle est un événement tellement violent qu'il propage des ondes de choc, tuant toute proie qui se trouvait autour. En outre, la bulle se ferme d'une façon si rapide que l'air chauffe jusqu'à 5 000 °C à l'intérieur : un flash apparaît alors. C'est un phénomène que l'on appelle la *sonoluminescence* dont cette crevette nous offre la seule manifestation naturelle connue.

### LES GOUTTES SUR TERRE ONT UNE TAILLE LIMITE.

Mais revenons à nos gouttes d'eau. Qu'elles soient rondes dans le nuage, nous l'avons compris. Mais qu'en est-il du théorème de Goethe, selon lequel même en tombant, elles conservent leur forme ? Nous avons du mal à le croire car le mouvement de l'air doit déformer les gouttes. Pourtant c'est vrai, comme le montre la photographie ci-contre.

Par ailleurs, l'équilibre entre le poids de la goutte qui la fait tomber et la friction de l'air qui la freine nous donne la vitesse à laquelle elle tombe. Vous devinez que plus la goutte sera grosse, plus elle va tomber vite. Or plus elle va vite, plus la friction de l'air est grande. En fait, il va se jouer un rapport de forces : si une goutte devient très grosse, les frottements de l'air peuvent être supérieurs à la force qui pousse cette goutte à rester ronde



Goutte d'eau millimétrique en chute libre dans l'air.  
Photo : Élise Lorenceau.



Goutte d'eau centimétrique en chute libre dans l'air, après quelques mètres de descente. Photo : Anne-Laure Bianco et Frédéric Chevy.

– sa tension superficielle. Elle n'arrive plus à être sphérique, mais elle n'est pas non plus comme on les dessine habituellement, c'est-à-dire comme une sorte de larme, ventrue d'un côté et pointue de l'autre. Imaginez cette grosse goutte en train de tomber, avec de l'air qui vient sans arrêt appuyer sur elle, la déformant : ces frictions de l'air aplatissent d'abord la face avant de la goutte, qui va ressembler à une sorte de hamburger, puis l'air va s'engouffrer dans la goutte et la gonfler comme une bulle d'air.





Elle devient alors encore plus grosse et... ses parois explosent, lâchant une myriade de petites gouttelettes. Si ces gouttelettes sont encore trop grosses pour rester rondes, elles explosent à leur tour, jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille suffisamment petite pour que les frottements de l'air ne puissent plus les déformer. Et voilà pourquoi, sur Terre, les gouttes ne font jamais plus de 3 millimètres de rayon (c'est ce qu'on appelle « la longueur capillaire »), même dans les averses tropicales. Heureusement, d'ailleurs, car si elles étaient plus grosses, leur masse et leur vitesse de chute feraient d'énormes dégâts sur le sol ! Et les grêlons, me direz-vous ? Ils peuvent en effet être 10 fois plus gros, et donc 1 000 fois plus lourds. Mais ils sont solides, et ne seront donc pas déformés par l'air, ne risquant pas d'exploser.

### DES GOUTTES QUI S'ACCROCHENT

La goutte est née, elle est en train de chuter dans l'air... Continuons son voyage jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec une surface. Là, les choses se compliquent. Car en plus du liquide et de l'air, intervient un solide. Pour comprendre ce qu'il se passe, je pose une goutte sur une feuille de plastique transparente, totalement imperméable, que j'éclaire par en dessous, comme sur un rétro-projecteur. La goutte apparaît comme un point noir : les frontières liquides tentant de rester sphériques, la lumière ne passe pas tout droit. Mais ce n'est pas une sphère parfaite car une partie de la goutte s'est aplatie au contact avec la feuille. C'est important car si vous cherchez à fabriquer une peinture, par exemple, vous voulez que cette goutte s'étale le plus possible, que le contact avec la feuille soit le plus grand possible. Or quelle taille fait ce contact pour notre goutte d'eau ? Eh bien, si la goutte fait à peu près 1 mm, ce contact sera aussi à peu près d'1 mm, et son angle est généralement entre 30 et 90°.

Continuons notre expérience - car en général, ce n'est pas une seule goutte d'eau qui tombe mais plusieurs. Donc je renverse un peu plus d'eau, disons 1 cm<sup>3</sup> d'eau, sur la feuille. À ce moment-là, je n'ai plus un point noir mais un objet presque blanc : les forces de gravité sont plus importantes que la tension superficielle et elles parviennent à aplatir cette petite flaque : la lumière peut donc passer. La différence entre une flaque et une goutte, c'est juste une question de taille, et donc de forme, en raison des forces de surface et de pesanteur. Mais on peut faire une petite variante. Si j'incline un peu la feuille, que se passe-t-il ? Dans le premier cas, la petite goutte reste collée, dans l'autre cas, la flaque dévale et tombe. Que la flaque dévale ne me surprend pas car comme elle est aplatie par les forces de pesanteur, elle continue d'obéir à ce champ de la pesanteur et se met à couler, ce qui est le propre des liquides. Mais pourquoi la goutte, elle, ne coule pas ? Parce que même si la surface de ma feuille de plastique paraît lisse, elle est couverte de poussière ou elle a d'invisibles petits défauts : la goutte s'y accroche, ce qui empêche son écoulement. Cela a une grande importance pratique parce qu'on connaît de nombreux exemples où cette propriété nous semble préjudiciable : l'eau qui reste

collée sur les vitres des serres empêche le soleil de les traverser ; la buée sur les lunettes vous gêne ; s'il n'y avait pas d'essuie-glace, vous ne verriez pas grand-chose à travers votre pare-brise par temps de pluie. Malgré la pente de mes lunettes, presque à la verticale, ou l'inclinaison du pare-brise, les gouttes restent en place. Comment prévenir ce phénomène, comment mettre au point un matériau où l'eau n'adhérerait pas à la surface, ne la mouillerait pas ? Ou comment éviter que le béton, à partir duquel sont faites presque toutes les constructions de travaux publics, s'imbibe d'eau, ce qui le fragilise ?

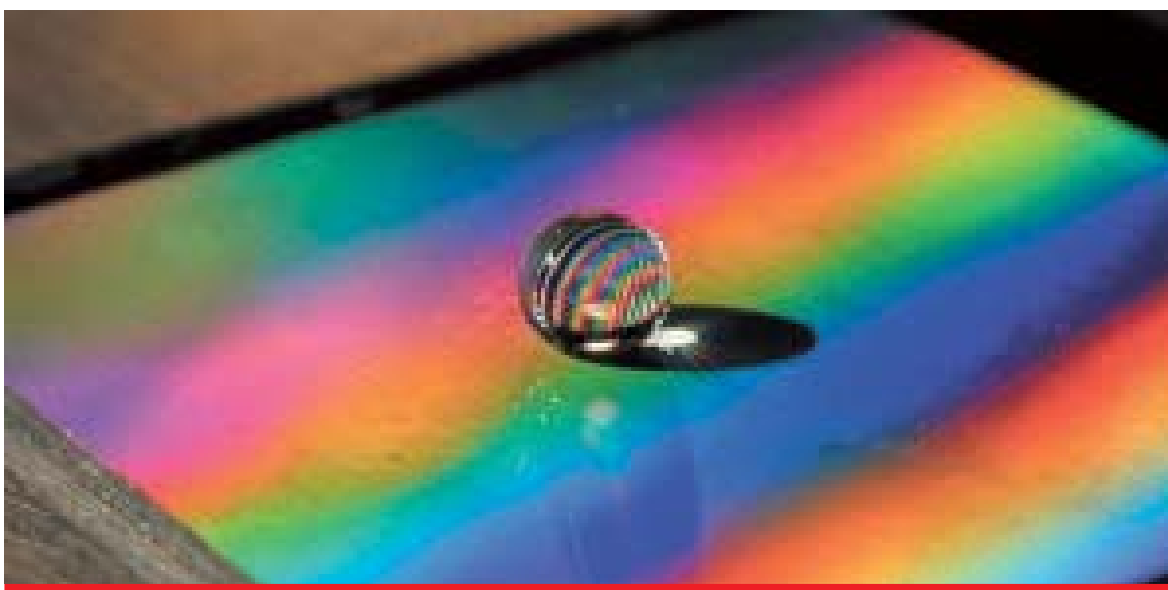
### À LA RECHERCHE DE LA GOUTTE PARFAITE

Beaucoup de recherches portent donc sur l'élaboration de matériaux dits hydrophobes (littéralement, « qui n'aime pas l'eau »). On voudrait idéalement que, sur un solide, l'eau reste comme elle était dans le nuage, c'est-à-dire sphérique, sans s'étaler ni entrer dans le matériau, permettant à ce dernier de rester sec ou du moins, de sécher très rapidement.

On connaît des substances chimiques qui sont hydrophobes, qui empêchent partiellement l'eau de rester accrochée. Les cires, par exemple, ou le téflon des poêles, qui « repousse » l'eau. Lorsqu'une goutte se pose sur un matériau de ce type, son angle de contact n'est plus de 90°, mais d'à peu près 120°. C'est le signe qu'on est sur la bonne voie : la goutte prend alors la forme d'une demi-sphère posée sur le solide. Mais c'est encore très loin du schéma idéal, où la goutte resterait parfaitement ronde, sans s'aplatir du tout, et donc sans mouiller la surface. Pour cela, il faut parvenir à un angle de contact de 180°. Les chimistes ont travaillé pendant des décennies mais ils n'y arrivaient pas. Et puis, révolution, il y a sept ans : une entreprise chimique japonaise a eu une idée toute simple. Il s'agissait de prendre une cire et de rendre sa surface rugueuse, à l'aide de grains minuscules d'un dixième de millimètres. On dit de ce matériau qu'il est texturé. Si on pose alors une goutte d'eau dessus, on constate qu'elle garde une forme très pure, un rond presque parfait, avec un angle de contact qui est cette fois de 174°. Reste à comprendre pourquoi la cire rugueuse aboutit à cet effet ultra-hydrophobe.

En fait, ce matériau est poreux, plein de petits trous comme une sorte d'éponge, mais en cire. Du coup, la plupart du temps, les gouttes reposent sur de l'air : elle est alors dans la même situation que dans le nuage et elle garde sa rondeur. Mais pour qu'elle tienne, elle ne peut pas reposer entièrement sur de l'air : une petite fraction touche des fragments de cire, ce qui explique qu'elle n'atteigne pas l'angle de contact de 180°. C'est ce que nous appelons « l'effet fakir ». Car cette goutte est comme un fakir sur le tapis de clous : elle ne s'enfonce pas, de même que le fakir ne s'empale sur les clous, mais reste à leur surface. Par conséquent, sous notre fakir, il y a surtout de l'air.

Il se trouve que la nature a produit un certain nombre de matériaux qui ont cette remarquable propriété de la cire rugueuse des industriels japonais. C'est le cas du



Goutte d'eau millimétrique sur un substrat texturé hydrophobe : la goutte garde la forme d'une perle (on dit du matériau qu'il est super-hydrophobe). La texture est un réseau de plots régulièrement organisés à l'échelle du micron, ce qui confère au matériau ses couleurs. Photo : Mathilde Callies.

nénuphar et du lotus, très hydrophobes. Non seulement parce qu'ils sont à base de cire, mais aussi parce que leur surface est recouverte d'invisibles bâtonnets, eux-mêmes pleins de petites fibres poilues. On retrouve la même chose pour les plumes du canard, sur lesquelles l'eau ne fait que glisser, ce qui permet au canard de sécher très rapidement. Récemment, un de mes collègues américains a observé ce phénomène pour les araignées d'eau, ce qui explique qu'elles parviennent à marcher à la surface de l'eau : l'eau « repousse » ses pattes. Du coup, depuis quatre ou cinq ans, la recherche industrielle met au point une foule de prototypes de matériaux qui s'inspirent souvent de ces exemples naturels.

### UN EFFET AUTO-NETTOYANT...

Je voudrais vous donner deux derniers exemples de situations de très grande hydrophobie. La première expérience a été menée par Pascale Aussillous, une étudiante native de Mazamet, qui a travaillé dans notre laboratoire et qui a eu une idée remarquable : au lieu de faire des structures à la surface d'un solide, on va faire l'inverse, en les fabriquant à la surface d'un liquide. Il s'agit donc de poser une poudre hydrophobe, de la suie par exemple, sur une goutte d'eau. Cette poudre ne rentre pas dans l'eau, puisqu'elle est hydrophobe. Elle va juste se poser à la surface de la goutte. Et si vous prenez cette goutte ainsi recouverte et que vous la posez sur le sol ou sur une plaque de verre, vous constaterez qu'elle reste parfaitement sphérique : grâce à cette protection poudreuse, elle n'est plus en contact avec la plaque. C'est tellement vrai que si vous la posez sur l'eau, elle flotte ! C'est le signe d'un non-contact absolu, de sa totale imperméabilité.

Le deuxième exemple a, lui, 250 ans. Il vient d'un médecin allemand, Leidenfrost, qui avait constaté que lorsqu'on verse de l'eau sur une plaque brûlante, elle n'a pas le temps de mouiller la plaque car elle se vaporise immédiatement. C'est ce qu'on appelle la *caléfaction* : quand l'eau, qui bout à 100 °C, arrive sur une plaque chauffée à 300 °C, elle se vaporise, et un petit film de vapeur s'intercale entre la plaque et l'eau, comme un coussin d'air, et la rend parfaitement non-mouillante. Si l'on reprend l'image du fakir, il n'a même plus besoin de clous pour le tenir. D'ailleurs, c'est grâce à ce film de vapeur qu'ils parviennent à marcher pieds nus sur des braises.

Continuons à nous intéresser à ces gouttes de Leidenfrost : lorsqu'elles arrivent sur la plaque chauffée à 300 °C, elles se mettent à bouger dans tous les sens de manière très rapide. Normal : le film de vapeur a supprimé le contact entre le solide et le liquide. Ces gouttes, qui ne sont alors entourées que d'air, sont comme la goutte de pluie qui tombe. Enfin, toujours sur cette plaque, elles jouent un véritable rôle d'aspirateur : une fois l'eau évaporée, il n'y a plus une seule poussière. C'est un effet qu'on appelle, en anglais, le *self-cleaning*, « l'auto nettoyage ». D'où un intérêt supplémentaire pour la fabrication de matériaux ultra-hydrophobes : non seulement les gouttes vont glisser très commodément sur ces surfaces, mais elles vont ramasser en plus toutes les saletés en partant. C'est probablement pour cette raison que l'on plante de plus en plus dans nos villes des arbres comme le ginkgo biloba, une espèce japonaise dont les feuilles ont les mêmes vertus que celles du nénuphar et du lotus et qui restent brillantes, sans poussières.



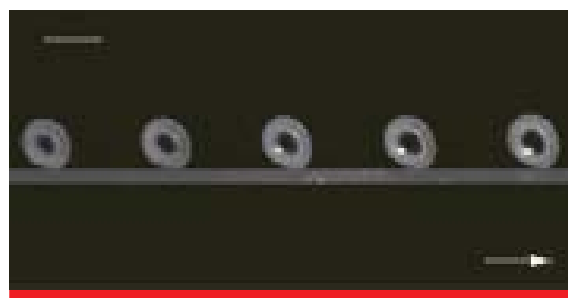
## LES LARMES, LES CACAHUËTES ET LES ROUES LIQUIDES.

Je vais conclure en illustrant les propriétés dynamiques exceptionnelles qu'ont les gouttes d'eau quand on les place dans cette situation de très grande hydrophobie. Sur le dévalement, d'abord : comme nous l'avons vu tout à l'heure, si je pose une goutte d'eau sur une plaque brûlante, elle tourne sur elle-même à une vitesse 100 à 1 000 fois plus rapide que lorsqu'elle descend sur une vitre. Et de fait, elle ne glisse pas, mais roule comme une bille solide. Or, il est justement intéressant que les gouttes puissent être évacuées à toute allure d'une surface, laissant en outre cette dernière absolument sèche, au contraire d'une larme qui glisse lentement sur la joue en abandonnant une traînée.

Mais à quoi ressemblent ces gouttes dévalant ? On pourrait se dire que c'est la même chose que pour les gouttes de pluie qui restent sphériques malgré la friction de l'air. Sauf que dans mon dernier cas, en plus, elles tournent sur elles-mêmes.

En fait, imaginez au ralenti une goutte dévalant une plaque ultra-hydrophobe. Elle n'a plus du tout une forme ronde : elle prend la forme d'une cacahuète qui bondit. Pour comprendre pour quelle raison elle adopte cette forme étrange, il faut remonter à Newton et à ses considérations sur la forme des corps célestes. Newton le premier a proposé que, parce que la Terre tourne, elle est centrifugée, de la même façon qu'on est déporté vers l'extérieur quand on prend un virage rapidement. Et ce phénomène, s'est-il dit, doit changer la forme de notre planète : cela doit l'aplatir un peu aux pôles et l'épaissir un peu à l'équateur - ce qui est vrai. Plus tard, au début du xx<sup>e</sup> siècle, Poincaré d'une part et un grand physicien indien, Chandrasekhar, d'autre part, ont compris que si la rotation était plus rapide, l'objet finissait par tendre à se séparer, comme en témoigne notre forme de cacahuète, qui est une étape vers cette séparation.

Il y a un deuxième type de déformation. Si on observe à la caméra rapide notre goutte qui dévale très vite, on se rend compte qu'elle peut également prendre la forme d'une roue liquide, trouée au milieu. C'était là l'idée de Pierre Laplace qui, après Newton, s'est demandé ce qu'il se passerait si la Terre tournait beaucoup plus vite. On connaît des exemples d'objets célestes qui tournent beaucoup plus vite que notre planète. Dans un premier temps, comme l'a dit Newton, la terre est aplatie aux pôles et gonflée à l'équateur, mais si sa rotation s'accélère de plus en plus, elle va s'aplatir au point de devenir un disque. Puis, à cause de la centrifugation qui tend à mettre la masse à l'extérieur de l'axe de rotation, et bien, très naturellement, ce disque se troue... Et citons pour finir une autre propriété très inhabituelle des matériaux très hydrophobes : si l'eau les frappe, elle y rebondit intégralement, à la manière d'un petit ballon solide : l'eau tape le matériau et s'en va. On devine l'intérêt d'un tel système pour nos pare-brise : les gouttes restant alors très peu de temps au contact, le pare-brise resterait quasiment sec, même sous la pluie. Peut-être vos futures voitures en seront-elles dotées. Mais pour



Forme de billes liquides dévalant des plans inclinés de 30°. Les images sont prises à l'aide d'une caméra rapide inclinée du même angle. La barre indique 1 cm, et l'écart entre deux images successives est de 9 ms dans le premier cas, et de 23 ms dans le second.  
Photos : Pascale Aussillous.

revenir à notre point de départ, cette dernière expérience illustre bien l'élasticité que leur frontière confère aux liquides : une goutte est comme un petit ressort, d'autant plus élastique que sa tension superficielle est grande.



**Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) : mathématicien et physicien français. Avec plusieurs autres savants de son époque, il publia de nombreux travaux en physique, principalement sur la cosmologie. Il explique ainsi comment s'est formé le système solaire à partir d'une nébuleuse, théorie encore valide aujourd'hui. Surnommé le « Newton » français, il s'est également consacré aux phénomènes de gravitation.

**Thomas Young** (1773-1829) : Ce physicien anglais se passionna d'abord pour les langues étrangères puis la botanique. Très jeune, il réalise d'abord son propre microscope pour mieux observer les plantes. Il commence ensuite des études médicales et ses premiers travaux scientifiques porteront sur la physiologie de l'œil. L'un de ses plus grands apports à la science concerne ses études sur l'optique, avec la théorie ondulatoire de la lumière.

**Johan Wolfgang von Goethe** (1749-1832) : Parallèlement à ses études de droit, il publie ses premiers livres de poésie. Après avoir composé une comédie, il s'intéresse également à l'architecture gothique allemande. Tandis qu'il s'installe comme avocat, il continue d'écrire, publiant des drames et des romans (dont *Les souffrances du jeune Werther*, 1774) et se passionne pour les sciences de la nature, dont la physique. Il publie plusieurs romans ou essais mettant en avant ses connaissances et ses hypothèses scientifiques : les Affinités électives en 1808 sur la chimie, ou encore la Théorie des couleurs.

**Joseph Plateau** (1801-1883) : Physicien belge, il a étudié les problèmes de tension superficielle et le comportement des liquides au contact d'une paroi solide. Il s'est également intéressé à l'optique et à la vision. Il a inventé le stroboscope, jetant les bases du cinématographe.

**La condensation** : Changement d'état de l'eau, qui passe de la phase gazeuse à la phase liquide ou solide. En fonction de la température, lorsque la quantité de vapeur d'eau atteint sa pression maximale dans l'air, tout apport nouveau de vapeur entraîne la condensation : au sol, celle-ci se traduit par le dépôt de rosée ou la formation de brouillard. En altitude, la condensation engendre les nuages. Mais la condensation ne s'opère en général que si des solides (poussières, cristaux de sel...) servent de supports permettant la naissance des gouttelettes. Ces impuretés dans l'atmosphère sont les « noyaux de condensation ».

**Daniel Bernoulli** (1700-1782) : Physicien suisse. Issu d'une famille de mathématiciens et de physiciens célèbres, il s'intéresse entre autres à l'étude des écoulements, des jets, de la propulsion des navires, du comportement des gaz, de l'élévation de l'eau par des pompes... Il publie ses travaux en 1738 dans un traité intitulé *Hydrodynamica*. La « Loi de Bernoulli » s'applique aux vibrations de l'air dans des tuyaux : selon cette loi, la pression de l'air diminue quand sa vitesse augmente.

**La sonoluminescence** désigne la conversion du son en lumière. Ce phénomène se produit lorsqu'une ou plusieurs bulles, piégées dans un liquide, s'effondrent sous l'effet de pressions extrêmes et de fortes températures à l'intérieur de la bulle. Elle émet alors une lumière.



---

## CLAUDIUS LABURTHE

Pilotant déjà un planeur à 16 ans, Claudius Laburthe n'a cessé de se consacrer à sa passion. Après son diplôme de Sup'Aéro, il devient en effet pilote de l'Armée de l'Air, puis ingénieur d'essais, d'abord au Centre d'Essais en Vol, où il se spécialise sur les commandes de vol des avions de combat, puis à l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (Onera), où il se consacre également aux deltaplanes et aux montgolfières. Intégrant Airbus Industrie (EADS) à partir de 1986, il y devient rapidement ingénieur navigant aux Essais en Vol Airbus, et s'attache à étudier tout particulièrement la physique de l'atmosphère, dont les phénomènes de givrage sur les avions. Depuis 2003, il forme des pilotes et ingénieurs d'essais pour Airbus. Auteur du livre *La pratique du vol libre* (ed. Arthaud, 1979), il a contribué au lancement de la Fédération Française de Vol Libre et préside la commission « Dirigeables » de l'Aéroclub de France.

---

---

LE POINT DU VUE  
DE L'INGÉNIEUR D'ESSAIS

## PLUIE, GIVRE ET GLACE : LES AVIONS SOUS HAUTE SURVEILLANCE

*En vol ou au sol, de simples gouttes ou des vapeurs d'eau peuvent provoquer sur un avion de menus incidents comme de grosses catastrophes. Des problèmes que les ingénieurs cherchent à mieux comprendre pour les éviter, quitte à changer la forme des avions. Attachez vos ceintures : l'ancien ingénieur d'essais Claudius Laburthe nous invitait ce jour-là à traverser les nuages, les ondées et les zones de turbulence et à en examiner les effets.*

David vous a expliqué ce qu'il se passe lorsque la pluie arrive au sol à des vitesses raisonnables. Malheureusement, les avions volent à environ 500 km/h. Et dans ce cas, la première chose que vous percevez... c'est le bruit. Un bruit infernal. À tel point que les pilotes sont obligés de remettre leur casque et de parler très près dans le micro. En revanche, à l'arrière, les passagers n'entendent presque rien. Ils voient des gouttes d'eau défilier le long des hublots et c'est tout.

### UNE PLUIE QUI DÉCAPE, UNE GLACE QUI PLOMBE...

La pluie a d'autres effets sur les avions, plus graves. Car à 500 km/h, une goutte d'eau a une force très grande. Elle ne peut pas se recomposer et elle éclate en de très nombreuses gouttelettes qui criblent le fuselage, abîmant la peinture du nez de l'avion, la décapant comme le ferait un karcher. En plus, le nez de l'avion contenant un radar, nous ne pouvons pas mettre de peinture épaisse, car elle stopperait le rayonnement du radar. Nous sommes donc obligés de changer les nez très régulièrement, ce qui coûte très cher. Pour l'instant, nous n'avons pas trouvé d'autre solution. En revanche, nous

pouvons renforcer le bord d'attaque de l'aile à l'aide de plaques de métal en aluminium ou en acier. Elles ne sont pas peintes, mais traitées avec un matériau qui est de la famille du téflon.

Plus perturbant encore : le givrage. Nous sommes dans les nuages et des gouttes d'eau se forment. Si ces nuages sont soulevés par des mouvements de l'atmosphère, ils atteignent des hauteurs où la température devient négative. Et là, il se passe un phénomène extrêmement bizarre. On pense en effet qu'il n'y a que trois états possibles pour l'eau : la vapeur, le liquide et la glace, en allant de 100 °C à 0 °C. Mais si vous prenez une gouttelette d'eau à +1 °C et que vous l'amenez à -1 °C, voire à des températures beaucoup plus basses, elle ne va pas forcément geler tout de suite. Dans un premier temps, elle va rester en « surfusion », sauf si elle entre en collision avec un solide, une surface. Dans ce cas, elle se fige en glace d'une manière très brutale, presque instantanée. Or, pour ce qui nous concerne, l'avion entre en collision à 500 km/h avec des gouttelettes en surfusion. Celles-ci se congèlent immédiatement et le nez de l'avion, l'avant de l'aile, le train d'atterrissage s'il est sorti, l'entrée d'air des moteurs, tout ce qui dépasse se couvre de glace. Cela peut-être très dangereux. Pour un avion léger, c'est même une catastrophe, car en quelques minutes, il se couvre de 100 à 300 kg de glace. Ainsi, une antenne radio peut s'alourdir de 10 à 20 kg de glace. À la moindre turbulence, elle se casse et nous perdons la radio qui va avec. L'avion en devient tellement lourd qu'il peut tomber. D'autre part, la forme de l'aile en est changée et elle n'a plus du tout les performances aérodynamiques normales. L'avion perd donc de la vitesse et il arrive qu'on soit obligé d'atterrir très rapidement si on ne parvient pas à sortir de ces nuages froids.



## DES AVIONS QUI ONT CHANGÉ DE FORME

Bien d'autres problèmes se posent à cause des gouttes d'eau et pas seulement en vol. Imaginez un avion qui vient de se poser à l'aéroport. Il pleut, la température est positive et a priori, il n'y a donc pas de problème de givrage. Malheureusement, à cause du vol qui vient d'avoir lieu en altitude, le carburant dans les ailes de l'avion est encore à des températures fortement négatives. Sur les Airbus, nous arrivons à des températures de  $-42^{\circ}\text{C}$  après une traversée de l'Atlantique. Du coup, lorsque la pluie tombe sur l'aile contenant ce carburant très froid, l'eau se met à geler et une plaque de glace se forme sur l'aile. Sur un avion tel que le Mac Donnell Douglas, avec les moteurs à l'arrière, quand ces plaques de glace commencent à fondre et se détachent, elles peuvent tomber dans le moteur, y provoquant des dommages. Ce type d'incident s'est reproduit un grand nombre de fois sur ces avions et il est en partie à l'origine de la faillite de cette société : elle a été rachetée par Boeing qui a cessé la ligne de fabrication des avions comportant des moteurs à l'arrière, trop exposés au givrage. Pour empêcher ce problème, on pourrait également chauffer le carburant, mais cela coûte cher et peut s'avérer dangereux en cas de surchauffe. La seule solution consiste donc, à placer les moteurs sous les ailes, ce qui est aujourd'hui le cas de tous les avions.

Tous ces phénomènes ont en effet des incidences sur la manière dont on dessine la ligne d'un avion. D'autant que les lignes d'écoulement de l'air le long de l'avion ne sont pas les mêmes que celles des gouttelettes, qui sont 100 à 1 000 fois plus lourdes que l'air. Alors que l'air commence à prendre le virage, sur le côté de l'avion et à contourner le bord d'attaque de l'aile, les gouttelettes elles, par inertie, continuent leur trajectoire tout droit sur l'aile, ne déviant qu'un tout petit peu. Les ingénieurs avaient d'ailleurs cru trouver là une explication à la forme que prend le givrage sur l'aile : une forme en croissant, au bout de l'aile. Malheureusement, la glace ne se dépose pas que là, et pas uniquement sous cette forme : le plus souvent, la dérive est également recouverte de glace. De même, si, à l'entrée d'air des moteurs, la chaleur empêche à cet endroit que cela givre, l'eau qui ruiselle regèle à l'arrière...

Bien sûr, du fait de tous ces problèmes, nous menons beaucoup d'essais, pour mieux comprendre la forme de givre que nous pouvons rencontrer en vol. Par exemple, à l'aide d'un tube de métal de 2 cm de diamètre placé à gauche du poste de pilotage. Et ce que l'on obtient le plus souvent n'est pas du tout un arc arrondi, comme le croissant dont je vous parlais, mais une sorte de double corne. La règle que nous avons finie par établir à force de faire des essais dans des conditions tout à fait différentes, c'est que nous n'avons cette forme d'arc que lorsque la température est extrêmement froide et que les gouttelettes sont très petites. Là, seulement, le givrage prend la forme que les ingénieurs avaient imaginée. Mais lorsque la température est entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $-10^{\circ}\text{C}$  seulement, les gouttes sont beaucoup plus grosses et il leur arrive bien des malheurs. Sur le devant

de l'avion, elles commencent à croiser les filets d'air : du vent à plusieurs centaines de km/h ! Elles prennent une véritable gifle, qui les fait exploser en plusieurs milliers de morceaux minuscules. Cela produit une sorte de brouillard, qui explique la manière dont se dépose le givre : une sorte de double corne, où la glace est beaucoup moins épaisse au milieu.

Quant au dernier modèle de l'A 340, nous sommes allés plus loin. Sur cet avion-là, nous avons en effet trouvé nécessaire de dégivrer le bord d'attaque en le chauffant, mais seulement sur une petite partie, pour faire des économies de poids. Et cela fonctionne parfaitement, comme nous l'avons démontré dans les vols de certification : en cas de givre, la partie de l'aile qui est juste avant le moteur est totalement intacte de glace.

**La surfusion :** Dans l'atmosphère, l'eau liquide ne passe pas forcément à l'état de glace lorsque la température descend en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Cet état est appelé la surfusion, qui peut avoir lieu jusqu'à des températures très basses. En fait, pour que ces gouttelettes passent à la phase solide, il faut qu'elles arrivent au contact d'une surface. Elles se congèlent alors immédiatement.



## QUESTIONS ET RÉPONSES

## DES VERRES AUTO-NETTOYANTS ET DES CHEVEUX-PARAPLUIE...

*À l'issue des deux conférences, les échanges entre les lycéens et les deux intervenants ont permis de revenir sur des points encore un peu obscurs ou de développer d'autres aspects des recherches sur les gouttes d'eau. Où l'on évoque les verres auto-nettoyants, des shampoings rendant vos cheveux imperméables, une astuce pour empêcher vos lunettes de s'embuer... Mais aussi le parcours et le métier de David Quéré et Claudius Laburthe, tous deux passionnés par une activité où même l'échec permet de mieux rebondir.*

J'ai entendu une publicité à la radio sur un nouveau verre auto-nettoyant, Bio-Clean, que Saint-Gobain a mis au point. Apparemment, il serait hydrophobe tout en restant transparent. Vous connaissez ce nouveau procédé qui semble très efficace ?

**David Quéré :** Tout à l'heure, je vous ai expliqué qu'on pouvait obtenir des matériaux extrêmement hydrophobes en mettant des petites pointes à sa surface d'un solide. Seul problème : en général, ce procédé fait disparaître la transparence. On aboutit à des verres un peu opaques, dépolis, tels qu'on les utilise pour des cabines de douche, par exemple. Mais Saint-Gobain a beaucoup travaillé à réduire la taille des petites textures placées à la surface du verre pour que celui-ci reste transparent.

Cela dit, il se trouve que pour Bio-Clean, il s'agit d'autre chose. Ce verre a été mis au point par Saint-Gobain, pour contrer une offensive commerciale d'un concurren-

rent anglais. C'est un verre issu de recherches japonaises portant sur des matériaux qui se nettoient tout seuls... Ce n'est pas un hasard : les Japonais sont très épris d'hygiène. Et c'est d'ailleurs une entreprise de sanitaires, « Toto », qui a mis au point ce nouveau matériau, à base d'oxyde de titane. Si on dépose de l'oxyde de titane sur la surface d'un verre ou même d'une céramique, il se passe un phénomène un peu complexe, que l'on comprend encore mal : les rayons ultraviolets du ciel, en frappant cette surface, dégradent chimiquement les matériaux organiques qui s'y sont déposés. Ces rayons les brûlent, exactement comme le ferait un feu, mais plus lentement. Ces matériaux organiques vont donc disparaître, se transformant en gaz carbonique et en eau. C'est très impressionnant à voir. Imaginez une table de verre traitée par un revêtement d'oxyde de titane. Si vous passez votre pouce dessus, vous savez tous que cela fera une trace. Mais ici, si vous attendez un quart d'heure, vous voyez cette trace disparaître progressivement : le dépôt qu'elle laisse sur la table a été brûlé par les rayons ultraviolets. Évidemment, cela ne fonctionne bien qu'à l'extérieur, car dans les maisons, les ultraviolets sont arrêtés par les vitrages standards.

Saint-Gobain a donc développé ces verres-là mais, chose tout à fait remarquable, ils ne savent pas bien comment ça marche ! Ils s'expliquent mal le mécanisme chimique, et ne savent même pas si c'est bien la raison pour laquelle ces vitrages restent propres plus longtemps. Car en plus, sur ce type de verre traité à l'oxyde de titane, l'eau a tendance à se déposer sous forme de film. Donc elle s'écoule, emportant les saletés qui peuvent être présentes à la surface du verre. Peu importe : pour la recherche industrielle, ce qui compte, c'est d'avoir un matériau qui marche. Cela a du bon, car les choses avancent, et du moins bon, parce qu'on n'est pas sûr de maîtriser réellement les capacités des nouveaux matériaux qu'on lance.

Pourquoi personne ne développe des pare-brise de voitures qui ne nécessitent plus d'essuie-glaces ?

**David Quéré :** Cela pose encore des problèmes techniques, car, comme on l'a dit, rajouter une texture à la surface du verre, c'est le rendre opaque. Et même si je parviens à faire une texture plus fine, le verre devient certes transparent, mais aussi légèrement irisé. Or, les principales firmes qui seraient intéressées par ces pare-brise-là fabriquent des voitures très haut de gamme, qui exigent un matériau absolument impeccable au niveau de la transparence. Mais il y a une deuxième raison. Les petites textures à la surface du verre sont susceptibles de s'encrasser. Et vu leur échelle minuscule, il est extrêmement difficile de les nettoyer. Nous ne sommes donc pas encore au point sur la manière dont ces matériaux vieillissent à l'usage.

**Claudius Laburthe :** A une époque, j'ai voulu introduire le pare-brise hydrophobe à Airbus Industrie. Je suis donc allé voir l'entreprise qui était susceptible de





les fabriquer. Son responsable a voulu savoir combien de centaines de pare-brises nous pouvions lui acheter par jour... Je lui ai dit « Écoutez, nous fabriquons 200 avions par an, soit moins d'un avion par jour. Cela fait donc à peine deux pare-brises par jour ouvrable ». Il m'a répondu : « Vous n'y pensez pas ! Moi, mes clients, ce sont des lunetiers qui me demandent 10 000 à 20 000, lunettes par jour, ou des constructeurs automobiles qui veulent 1 000 pare-brises par jour. Votre truc, ça ne m'intéresse pas... »

Si toutes les grandes tours étaient équipées de verres hydrophobes, que deviendrait l'eau qui rebondit dessus ? N'est-ce pas dangereux pour les piétons qui passent dessous ?

**David Quéré :** Effectivement, quand la goutte de pluie tape une surface très hydrophobe, elle rebondit. Elle va alors tout simplement s'ajouter à la pluie, qui sera un peu plus fournie puisque tout ce qui aurait dû s'écouler le long de l'immeuble se répercute sur la rue. Mais ce jour-là, les habitants auront eux-mêmes des parapluies super-hydrophobes, et ils seront parfaitement protégés ! Certains fabricants de cosmétiques pensent même à inventer des shampoings qui rendraient vos cheveux super-hydrophobes. Un cheveu observé au microscope électronique est, vous le savez peut-être, couvert d'écailles. Il a donc naturellement des textures qui font un micromètre, ce qui est une bonne dimension pour « repousser » l'eau. S'ils y arrivent, ce sera votre chevelure elle-même qui sera un parapluie.

Est-ce que le problème de givrage des avions a produit des accidents et l'A380, qui est un très gros porteur, sera-t-il protégé de ce type d'incidents ?

**Claudius Laburthe :** L'A380 est tellement gros que ce n'est pas 3 cm de glace sur l'aile qui le perturberont... À l'inverse, les avions légers des aéroclubs ont l'interdiction absolue de rentrer dans les nuages en cas de grand froid et de s'exposer ainsi au givrage. Ce sont donc les avions intermédiaires qui rencontrent le plus ce risque ! Les avions taxis, par exemple. Nous avons malheureusement perdu au moins deux ATR avec leurs équipages à cause du givrage. Nous donnons donc des consignes très strictes à ces avions. Et les petites compagnies aériennes comme Air Littoral, qui ont principalement des avions moyen-porteurs, y sont très attentives. Ils ont toujours un plan de vol de secours en cas de givrage, qui leur permet d'éviter les nuages.

Je voudrais savoir quelle forme prend l'eau dans l'espace, quand il n'y a pas d'air autour ?

**David Quéré :** D'une certaine façon, sur Terre, la gravité complique les choses. La pesanteur se rajoute à des phénomènes qui sont déjà assez complexes. Du coup, sur les questions de traitements de surface, nous travaillons beaucoup en « microgravité », c'est-à-dire comme dans la navette spatiale, ou dans des 'tours de chutes', qui font à peu près cent mètres de haut et

dans lesquelles on lâche un petit ascenseur en chute libre. Durant les quelques secondes de sa chute, nous menons des expériences, à l'aide de caméras embarquées. De fait, les choses prennent un tour totalement différent. Prenez le feu, qui est lié à la pesanteur : l'air chaud monte, de l'air froid redescend, et c'est ce va-et-vient qui alimente les feux, leur amenant de l'oxygène. Si vous faites un feu dans la navette spatiale – ce qui n'est pas recommandé – il n'aura pas du tout cette forme ascensionnelle qu'on connaît bien : cela donne une boule qui, en général, meurt assez vite en l'absence de ce mouvement de convection. Mais dans mon domaine, travailler en microgravité n'a pas produit grand-chose parce qu'il est très lourd de monter des expériences dans les navettes spatiales qui durent une poignée de secondes. Par ailleurs, dans l'espace, non seulement il n'y a plus de gravité mais il y a aussi le vide. Et là, la goutte va s'évaporer et disparaître. L'histoire se termine pratiquement aussi vite qu'elle a commencé, tout simplement parce que le vide absorbe la matière.

Je voulais qu'on revienne sur l'explication de la goutte qui s'accroche à une paroi de verre même verticale. Je n'ai pas bien compris.

**David Quéré :** En fait, qu'est-ce que la buée ? C'est cela la question. Pour former de la buée, je prends de l'air chaud, celui qui sort de ma bouche à 37 °C. Cet air est saturé en eau et cette vapeur d'eau se trouve projetée sur mes lunettes qui, elles, sont à 20-22 °C. Si je suis dans une station de sport d'hiver, mes lunettes seront même plutôt à 0 °C. Et là, l'air que j'ai soufflé se retrouve à une température nettement plus basse, ce qui le condense : en clair, la vapeur va devenir de l'eau sous forme de gouttes. En fait, la manière la plus simple de l'observer, c'est en regardant une casserole d'eau chauffer. Je vois de la fumée. Presque tout le monde dit : « C'est de la vapeur d'eau ». Eh non, ce n'est pas vrai car on ne peut pas voir la vapeur d'eau. Elle est comme l'air : absolument transparente. La fumée, c'est de l'eau qui, après être sortie à 100 °C sous forme de vapeur et que je ne vois pas, se retrouve dans un air plus froid et donc qui s'y condense sur des micro-poussières.

C'est la même chose que ce que je vous ai expliqué précédemment pour un nuage. Cela produit des micro-gouttes. C'est pour cela qu'on voit quelque chose de blanc qui monte, entraîné par l'air chaud s'échappant de la casserole. Voilà ce qu'est la buée : des millions de gouttes minuscules arrivant au contact d'un solide. Une petite partie de chacune de ces sphères va alors se poser, se condenser sur mes lunettes, ce qui a pour le même effet qu'une texture rugueuse à l'échelle du millimètre : cela va rendre mes verres opaques, comme un verre dépoli.

Comment éviter ce phénomène ? Prenez des lunettes et un morceau de pomme de terre avec lequel vous frottez les verres. Puis, soufflez sur vos lunettes. Qu'est-ce que vous allez voir ? Rien du tout ! Car le dépôt qu'a fait la pomme de terre a rendu le verre totalement hydrophile : chaque petite goutte va complètement s'étaler,





formant un film d'eau à la surface des lunettes, ce qui leur conserve leur transparence absolue. Vous ne supprimez donc pas la buée, ni la condensation de l'eau, mais vous avez simplement rendu cette couche transparente.

Pouvez-vous nous parler, tous les deux, de vos joies d'ingénieur et de chercheur ?

**Claudius Laburthe :** Je suis très vieux par rapport à vous puisque j'ai passé mon bac en 54... Je suis d'une génération où, une fois que l'on rentrait dans une filière, on y restait toute sa vie. Moi, je n'ai pas trop voulu faire cela. Je m'intéressais à tous les aspects de l'aviation. J'ai commencé par être pilote, j'ai ensuite intégré le Centre d'essais en vol mais je suis également retourné dans la recherche pendant 11 ans, à l'ONERA qui est l'équivalent en France de la NASA américaine. J'ai donc fait une carrière totalement imprévue, et j'en suis ravi. Pour moi, il ne faut pas avoir peur de l'inconnu, il faut foncer quand il y a des trucs intéressants à faire.

J'ai terminé à Airbus, mais j'ai toujours été heureux partout où j'étais, et je voudrais engager les gens de votre génération à ne pas écouter les mauvais propos qu'on leur tient, à ne pas dire, « Oh la la, autrefois c'était facile, aujourd'hui c'est difficile de trouver du boulot ». C'est vrai qu'il n'est pas forcément facile de trouver un travail, mais quand on se passionne pour quelque chose, on trouve toujours des opportunités et il faut y mordre.

**David Quéré :** Je vais dire à peu près la même chose mais différemment. La particularité de la recherche, comme pour tous les métiers de création, c'est qu'il s'agit de faire apparaître quelque chose là où il n'y avait rien. Cela nécessite beaucoup d'énergie, mais cela nous donne aussi une force qui peut permettre de soulever des montagnes ! Nous connaissons évidemment beaucoup de hauts et de bas, et pour être plus précis et plus honnête, plus de bas que de hauts. Je dirais même qu'un bon chercheur, c'est quelqu'un qui sait gérer l'échec, qui sait en tirer parti pour rebondir dans une autre direction. Il y a une phrase que j'aime beaucoup, et qui est d'un grand physicien danois du xxe siècle, Niels Bohr : « Est expert dans un domaine celui qui a fait toutes les erreurs dans ce domaine ». La recherche est le métier de l'erreur, si vous voulez. Et si l'on parvient à façonner son esprit pour s'en accommoder, cela devient très amusant.

A la limite, l'échec est alors très porteur car à en comprendre les raisons, on peut aboutir à des idées nouvelles. On apprend à réagir. Cela dit, quand on se trompe, qui nous corrige ? En général, ce sont les autres. Et justement, un des charmes principaux de ce métier, c'est qu'il se fait en équipe. Dans mon cas, j'ai la chance de travailler avec des étudiants et des collègues avec lesquels je passe beaucoup de temps à échanger les idées. En outre, la communauté scientifique est de dimension mondiale : nous sommes connectés en permanence les uns avec les autres, et nous avons des amis un peu partout sur la planète, à Boston, à Dehli, à Canberra. Et puis je dois ajouter que les gens que je

rencontre dans ce métier sont souvent fascinants. Il vaut en effet mieux avoir un esprit non-conventionnel pour faire de la recherche, ou savoir adopter un point de vue inattendu. Dit autrement, le facteur humain vient réchauffer un univers qui sans cela serait peut-être assez froid.



## QUELQUES RESSOURCES DOCUMENTAIRES

« *Savoir s'émerveiller devant une goutte d'eau* »  
Pierre-Gilles de Gennes,  
Prix Nobel de physique 1991

### LES ÉCRITS DE DAVID QUÉRÉ

#### Des ouvrages

• **Quéré David**

*Qu'est-ce qu'une goutte d'eau ?*

Le Pommier, 2003.

Les Petites Pommes du Savoir

« Qu'est-ce qu'une goutte d'eau ?

D'abord, quelle est sa forme :  
ronde ou pointue ? Ou les deux à  
la fois ? Et en quoi cette question  
a-t-elle un rapport avec nos pro-  
duits de maquillage, nos examens  
médicaux ? Quelles surprises ce  
petit objet familier et mou nous  
réserve-t-il donc ? »

• **De Gennes Pierre-Gilles de,  
Brochard-Wyart Françoise et  
Quéré David**

*Gouttes, bulles, perles et ondes.*  
Belin, 2002.

Comment faire pour que les  
gouttes d'eau glissent sur les  
pare-brise, que les shampoings  
moussent ou que les pesticides  
pulvérisés sur les feuilles des

plantes y restent accrochés ?  
L'ouvrage décrit et explique ces  
phénomènes de capillarité et de  
mouillage qui préoccupent  
industriels et ingénieurs.

• **Quéré David.**

Bulles, gouttes et perles liquides.

*Graines de sciences, n° 3.*

Le Pommier, 2001

L'auteur, qui s'intéresse aux  
gouttes et perles liquides, nous  
familiarise avec leurs propriétés  
et les applications technolo-  
giques qui en découlent. L'étude  
porte sur plusieurs points parti-  
culiers : tension superficielle,  
mouillage et étalement de  
liquides, montée capillaire, ten-  
sioactifs.

#### Des articles de périodique

• **Quéré, David,  
Clanet Christophe**

Sur la forme des gouttes et des  
bulles. *La sphère sous toutes ses  
formes : Dossier Pour la Science,*  
n° 41, octobre 2003.

D'où vient qu'une « petite »  
goutte soit sphérique ? Et qu'en  
est-il des « grosses » ? Et des  
bulles ? Au-delà des phéno-  
mènes quotidiens, répondre à  
ces questions aide à com-

prendre ce qui modèle certains  
objets célestes.

• **Quéré David,  
Aussillous Pascale**

*Billes liquides. Pour la science,*  
n° 286, août 2001.

Les billes liquides sont des  
gouttes d'eau recouvertes d'une  
poudre hydrophobe. Ainsi tru-  
quées, ces gouttes ne mouillent  
pas, prennent la forme de roues  
ou de cacahuètes en roulant. Des  
photographies illustrent le phé-  
nomène.

#### Sur le web

[www2.cnrs.fr/presse/thema/  
376.htm](http://www2.cnrs.fr/presse/thema/376.htm) Sur ce site du cnrs, un  
article présentant les travaux de  
David Quéré sur les matériaux  
hydrophobes imitant des phéno-  
mènes naturels.

• **Quéré David,  
Bergeron Vance**

*La protection des récoltes.*

ESPCI, 2003

[www.espci.fr/esp/CONF/20  
03/CO3\\_02/conf2\\_2003  
.htm](http://www.espci.fr/esp/CONF/2003/CO3_02/conf2_2003.htm)

Compte rendu de la conférence  
donnée par David Quéré et  
Vance Bergeron le 19 mai 2003 à  
l'École Supérieure de Physique  
et de Chimie Industrielles de la  
ville de Paris. Lorsque les agri-  
culteurs pulvérisent leurs plan-  
tations, les gouttes de produit  
traitant rebondissent sur les  
feuilles. Comment limiter ce  
phénomène.

• **Des gouttes rebondissent.**

ARTE, 1998

[www.arte-tv.com/hebdo/archi-  
med/19981208/ftext/sujet3  
.html](http://www.arte-tv.com/hebdo/archimed/19981208/ftext/sujet3.html)

David Quéré propose d'observer  
le comportement d'une goutte  
d'eau déposée sur une surface  
hydrophobe. (Retranscription  
intégrale du reportage TV réalisé  
par l'émission Archimède le  
8 décembre 1998).

• **Quéré David, intervenant,  
Prédignac Christophe, réal.**

*Au bout du fil : cette semaine  
Archimède a rencontré David  
Quéré, physicien.* ARTE, 1998



[www.arte-tv.com/hebdo/archimed/19980421/ftext/sujet2.html](http://www.arte-tv.com/hebdo/archimed/19980421/ftext/sujet2.html)

Comment se forme la myriade de gouttelettes qui couvre les bras de la toile d'araignée ? Retranscription de l'émission Archimède du 21 avril 1998.

#### AUTRES DOCUMENTS SUR LE SUJET

##### Des ouvrages

• **Laguès Michel, Gennes Pierre-Gilles de, préf.**

*L'eau au quotidien.*

Odile Jacob, 2001

Une découverte des phénomènes physiques les plus complexes à partir d'une observation des propriétés les plus familières de l'eau.

• **Gennes Pierre-Gilles de, Badoz Jacques**

*Les objets fragiles.* Pocket, 1996  
Nés d'une série de rencontres entre P.-G. de Gennes et des lycéens, ces entretiens, qui ont largement débordé sur le devenir de la recherche, portaient sur la matière molle (matières plastiques, bulles de savon, transformation de l'eau par certains polymères). On lira en particulier

le chapitre : *À la surface des choses : mouillage et dé mouillage.*

• **Daoud M. dir., Williams C. dir.**

*La juste argile : introduction à la matière molle.*

Les Éditions de Physique, 1995

« Le but du présent livre n'est pas d'entrer dans le dédale théorique sur les molécules, mais plutôt de montrer, sur des exemples relativement simples, comment les expériences et les concepts se marient, de nos jours, à propos d'objets courants : savons, caoutchoucs, émulsions, plastiques, grains en suspensions » On lira avec intérêt le chapitre i de Françoise Brochart-Wyart : *Histoires de gouttes : capillarité et mouillage.*

##### Des articles de périodique

• **Bac to basics : l'eau**

*La Recherche*, n° 372, février 2004.

Un dossier de vulgarisation scientifique sur l'eau : à quoi ressemble la molécule d'eau ? Comment les molécules s'organisent dans le liquide ? Pourquoi l'eau gèle-t-elle à 0° et bout-elle à 100° ? Les nuages sont-ils constitués d'eau qui s'est évaporée ? Y a-t-il de l'eau dans l'espace ? Etc.

• **Podgorski Thomas, Flesselles Jean-Marc**

La forme d'une goutte qui ruisselle. *Pour la science*, n° 301, novembre 2002.

Quand une goutte glisse sur une surface inclinée, elle forme un front arrière en « coin ». Une étude qui peut avoir des applications industrielles comme l'impression à jet d'encre ou le traitement de l'eau. Des photographies illustrent le phénomène.

• **Une goutte d'eau peut rebondir comme un ressort**

*Science et vie*, n° 1020, septembre 2002.

Actualités : le rebond d'une goutte d'eau sur une surface hydrophobe filmé par des chercheurs.

• **Bonn Daniel,**

**Bergeron Vance, Vovelle Louis**

Quand les gouttes ne rebondissent plus : comment rendre l'eau aussi visqueuse que le miel ?

*La Recherche*, n° 351, mars 2002.

Lorsqu'elle tombe sur une feuille une goutte d'eau rebondit. Comment limiter ce phénomène et concevoir des aérosols efficaces pour l'agriculture ? Quelques grammes de polymères peuvent modifier les propriétés d'écoulement de l'eau...

• **Greffoz Valérie**

Les gouttes d'eau ne sont plus ce qu'elles étaient. *Science et vie*, n° 1011, décembre 2001.

Études menées en 2001 sur le comportement des gouttes d'eau recouvertes de poudre hydrophobe : histoire de la création de ces gouttes d'eau, leurs propriétés, leurs différentes formes prises en fonction de leur vitesse, les moyens utilisés pour les empêcher de rebondir, les applications pratiques de cette technique.

• **Brochart-Wyart Françoise**

Quand les liquides démouillent : des surfaces sèches, archisèches, qui ont séché sans sécher.

*La Recherche* n° 286, avril 1996.

« Le démouillage, naissance sans évaporation de régions sèches



signe ici un des premiers articles de fond sur le sujet.

**Sur le web**

• *Des gouttes d'eau indéformables?* Tout ce qu'il faut savoir sur l'eau, 2002.

[www.chez.com/exposeh2o/eau\\_indeformable.htm](http://www.chez.com/exposeh2o/eau_indeformable.htm)

[http://membres.lycos.fr/exposeh2o/eau\\_indeformable.htm](http://membres.lycos.fr/exposeh2o/eau_indeformable.htm)

Une page web, destinée à la préparation des TPE, qui rend compte des travaux de David Quéré, Pascale Aussillous et Vance Bergeron : étude de la forme sphérique d'une goutte, transformation de gouttes en billes liquides qui en roulant prennent la forme de cacahuètes, applications industrielles envisagées.

• **Ball, Philip**

*Lotus inspires dirt repellent spray.* *Nature*, 2002.

[www.nature.com/nsu/021118/021118-4.html](http://www.nature.com/nsu/021118/021118-4.html)

[www.nature.com/nsu/000810/000810-4.html](http://www.nature.com/nsu/000810/000810-4.html)

Des sprays antipoussières inspirés du lotus : les gouttes de pluie ruissellent très facilement le long des feuilles de lotus grâce à la forme et à la composition chimique de leur surface. Les gouttes captent les poussières au passage et les emmènent avec elles, ce qui explique la propreté constante de ces feuilles. Des chimistes ont développé des sprays qui imitent ce comportement pour des matériaux aussi divers que les textiles, le papier, la pierre, le verre (devantures de magasins et pare-brise). Texte en anglais.

• **Demarthon Fabrice**

*Un seul « pschh » suffit.*

*Infosciences*, 2000.

[www.photoamateur.net/goutte.htm](http://www.photoamateur.net/goutte.htm)

L'incorporation de polymères dans les produits pulvérisables permet d'empêcher le rebond des gouttes et donc le gaspillage. Cette découverte de Vance Bergeron devrait être utilisée pour améliorer l'épandage des pesticides et des herbicides. (Source de l'article : *Nature*, vol 405, pp772-775, 2000)

• **Philippe Bœuf**

*Robert in space*

<http://perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf/robert/>

[physique/matierequest.htm](http://physique.matierequest.htm)

Sur son site personnel Philippe Bœuf, enseignant, répond aux questions que peuvent se poser des lycéens préparant des TPE : Pourquoi les gouttes d'eau qui courent-elles sur une plaque chauffante ? Pourquoi est-ce que les gouttes d'eau sont rondes ? Pourquoi suis-je mouillé quand il pleut ? Comment tiennent les châteaux de sable ? Comment sont formées les bulles de savon ?

• **Tocheport Bernard Gilles**

« *Plitch platch* » : portraits de la goutte d'eau ».

Photos d'amateurs pour amateurs de photos.

[www.photoamateur.net/goutte.htm](http://www.photoamateur.net/goutte.htm)

Belles photographies de gouttes d'eau en train de tomber prises par un amateur.

sur une surface initialement mouillée, fascine les physiciens et nargue -ou charme- les industriels. D'une grande richesse théorique, ce phénomène dépend tant du liquide que du substrat sur lequel il repose ».

• **Ondarçuhu Thierry**

Mouillage de surfaces mixtes. *Bulletin de la Société française de physique*, 102 19, 1995.

Le résultat des travaux de Thierry Ondarçuhu, chercheur au CEMES, laboratoire de recherche du CNRS de Toulouse.

• **Tanner Léonard H.**

Les gouttes.

*La Recherche*, n° 174, février 1986.

Sous l'effet des forces qui s'exercent sur elles, les gouttes prennent des formes très variées. L'auteur décrit et analyse une série d'expériences qu'il a réalisées. De belles et surprenantes photographies illustrent l'article.

• **Gennes Pierre-Gilles de**

Comment s'étale une goutte ? *Pour la Science* n° 79, mai 1984.

Une goutte, posée sur une plaque solide, s'étale d'abord vite, puis très lentement : explications du phénomène. P-G de Gennes

Joëlle Caillard  
CRDP Midi-Pyrénées. Avril 2004