



DUCHAMP Marcel, *Nude Descending a Staircase, No. 2* Date : 1912 ; © succession Marcel Duchamp / ADAGP, Paris 2012 ; © Philadelphia Museum of Art/CORBIS

IDÉES DE PHYSIQUE

Les brouillards de mélange

Le mélange de deux masses d'air de températures différentes peut, en fonction de leurs hygrométries, créer un brouillard. C'est le procédé employé dans les salles de spectacles.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Certains matins d'hiver, nous produisons de la brume blanche en soufflant dans l'air froid (voir la figure 1). D'autres matins, pourtant tout aussi froids, il ne se passe rien. Pourquoi ? Le refroidissement de l'air humide que nous expirons n'est-il pas à l'origine de la brume ? L'explication est à rechercher dans le fait qu'en se mélangeant à l'air ambiant, l'air expiré voit non seulement sa température diminuer, mais aussi sa teneur en eau. Le mécanisme de formation du « brouillard de mélange » qui peut en résulter est semblable à celui des traînées d'avion ou des générateurs de fumée utilisés dans certains spectacles.

Le brouillard, un air sursaturé en eau

À température ambiante (20 °C), un mètre cube d'air contient au maximum 18 grammes de vapeur d'eau. C'est par exemple l'humidité présente dans l'air occupant le haut d'une bouteille d'eau bouchée. Tant que la teneur en eau est inférieure à ce seuil, l'eau reste sous forme de vapeur et forme avec les autres molécules de l'air un mélange gazeux transparent. Quand le seuil est atteint, on dit que l'air est saturé et que l'hygrométrie est de 100 pour cent.

Lorsque la teneur en eau dépasse le seuil de 18 grammes par mètre cube à 20 °C, l'eau en excès se condense,

formant de minuscules et innombrables gouttelettes liquides qui diffusent la lumière et donnent aux brouillards et aux nuages leur apparence laiteuse. Or le seuil de saturation de l'air augmente fortement avec la température : aux températures ordinaires (entre 0 et 30 °C), il double à peu près tous les dix degrés. En refroidissant suffisamment une masse d'air non saturée, on peut donc lui faire franchir le seuil de saturation. Par exemple, de l'air à 60 pour cent d'humidité à 30 °C (environ 18 grammes d'eau par mètre cube d'air) devient, à 10 °C, sursaturé à 200 pour cent : la moitié de l'eau contenue dans l'air va se condenser.

Doit-on alors attribuer au seul refroidissement la formation de brouillard lorsqu'on

souffle dans un air hivernal ? Il ne faut pas oublier que dans cette situation, on a un fort brassage entre l'air expiré et l'air ambiant. Le mélange obtenu juste après l'expiration est évidemment plus froid que l'air expiré, mais son hygrométrie est aussi modifiée. Or il n'est pas évident de savoir si cette dernière sera supérieure ou inférieure au seuil de saturation.

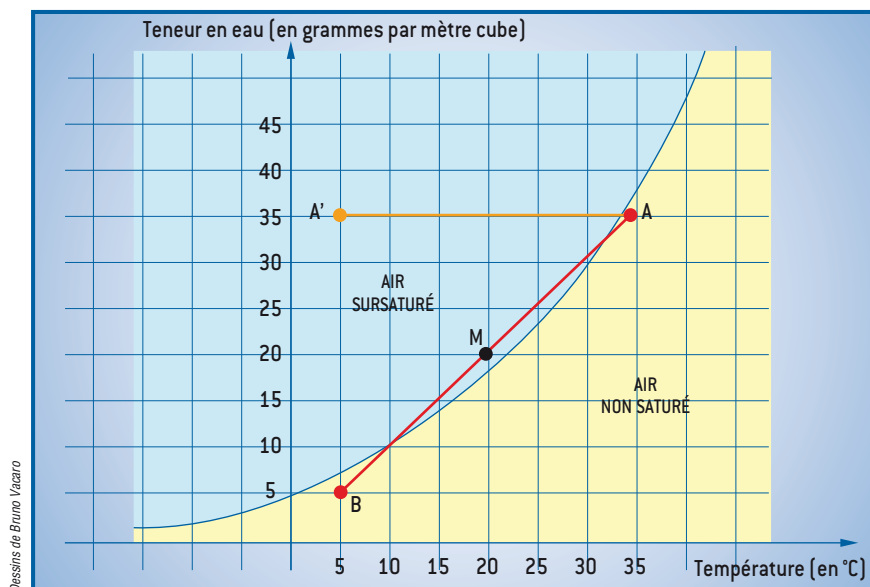
Pour déterminer ce qui peut se passer, il est indispensable de se reporter à la courbe qui représente la teneur en eau à saturation en fonction de la température (voir la figure 2).

L'air que nous expirons est à une température d'environ 33-34 °C, et il est pratiquement saturé d'humidité avec près de 36 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. Son point représentatif est sur la courbe : si l'on se contente de refroidir cet air, la vapeur d'eau se condensera immédiatement.

Qu'en est-il si on le mélange ? Pour simplifier, supposons que les deux airs soient en proportions égales. La teneur en vapeur d'eau du mélange sera alors égale à la moyenne des teneurs en eau de l'air expiré et de l'air ambiant, et sa température à la moyenne des deux températures. Par exemple, si l'air ambiant est complètement sec, la teneur en vapeur d'eau du mélange sera de 18 grammes par mètre cube ; la condensation ne sera possible qu'avec une température



1. L'AIR EXPIRÉ dans de l'air ambiant froid produit parfois un « brouillard de mélange », en fonction de l'hygrométrie de l'air ambiant et de sa température. Le même phénomène est à l'origine des traînées de condensation créées par les réacteurs des avions de ligne à haute altitude.



2. LA COURBE DE SATURATION en vapeur d'eau sépare la phase gazeuse (en jaune) de la phase sursaturée (en bleu) où la vapeur d'eau se condense. Une masse d'air à 34 °C et contenant 35 grammes d'eau par mètre cube n'est pas saturée (point A). Si par exemple on la refroidit jusqu'à 5 °C (segment AA'), elle franchit le seuil de saturation et la vapeur d'eau se condense. Si on mélange l'air à 34 °C avec une même masse d'air non saturé à 5 °C et contenant 5 grammes d'eau par mètre cube (point B), le point représentatif du mélange sera au milieu M du segment AB, c'est-à-dire dans la phase sursaturée : un brouillard aura été créé par le mélange de deux masses d'air non saturé.

finale de 21 °C et moins, c'est-à-dire une température de l'air ambiant de 8 °C et moins. Une température supérieure nécessite d'élever son hygrométrie : pour un air ambiant à 14 °C, il faut une teneur en eau d'au moins 8 grammes par mètre cube, soit environ 65 pour cent d'humidité, pour que l'expiration produise un brouillard.

En pratique, les estimations précédentes se révèlent fausses, car la proportion du mélange, sans doute très inférieure à 50 pour cent d'air expiré, est difficilement contrôlable. Toujours est-il que le point représentatif d'un tel mélange est forcément sur le segment reliant, sur le diagramme, les points correspondant à l'air expiré et à l'air ambiant.

En jouant sur la puissance de son souffle, on peut se déplacer sur ce segment : un souffle léger (peu d'air expiré dans le mélange) ne donnera lieu à aucune condensation, tandis qu'un souffle plus puissant (plus d'air expiré dans le mélange) provoquera la formation de brouillard. La forme convexe de la courbe de saturation autorise d'ailleurs une situation étonnante : en mélangeant deux airs non saturés et de températures distinctes, il est possible d'obtenir un air dont l'hygrométrie est supérieure à 100 pour cent, donc où se forme un brouillard.

On peut retrouver ces brouillards de mélange à proximité de surfaces d'eau plus chaude que l'air ambiant. Ces surfaces réchauffent et humidifient l'air qui les surmonte ; ce dernier, devenu moins dense, s'élève et peut former un brouillard. C'est souvent le cas en hiver au-dessus de sources thermales chaudes ou de piscines chauffées, ou chez soi au-dessus d'une soupe ou d'un café bien chauds !

Des avions aux machines à brouillard

Le même mécanisme permet aussi de comprendre pourquoi les avions laissent parfois des traînées blanches dans le ciel. La combustion du carburant dans les réacteurs produit, entre autres, de la vapeur d'eau. Le gaz chaud éjecté par les tuyères se mélange avec l'air ambiant et se refroidit. Dans les conditions atmosphériques usuelles, ce mélange sera à l'origine d'un brouillard entre 8 et 19 kilomètres d'altitude pour de l'air ambiant saturé, et entre 10 et 14 kilomètres d'altitude pour de l'air sec : ne sont donc concernés que les avions de ligne en vol de croisière.

En dehors de ces domaines, même si l'air ambiant est saturé, la quantité d'eau ajoutée par le réacteur n'est pas

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTLY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

E. Vitz, *Fog machines, vapors, and phase diagrams*, *J. of Chem. Educ.*, vol. 85(10), pp. 1385-1388, 2008.

J.-P. Chalon, *Combien pèse un nuage*, EDP Sciences, 2002.

Les nuages d'intérieur de l'artiste Berndnaut Smilde : <http://www.berndnaut.nl/works.htm>

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





3. LES BROUILLARDS de mélange créés dans les spectacles contiennent non seulement de l'eau, mais aussi de la glycérine ou du propylène glycol, deux composés non toxiques qui permettent de ralentir l'évaporation des gouttelettes et ainsi d'obtenir un brouillard plus persistant.

suffisante pour compenser son refroidissement avec l'air ambiant. Pour ces traînées dites de condensation, les turbulences atmosphériques continuent de brasser les masses d'air après le passage de l'avion. Si l'air ambiant est peu humide, les traînées disparaissent rapidement à cause de l'évaporation des gouttelettes. En revanche, lorsque l'air ambiant est légèrement sursaturé, les traînées peuvent persister assez longtemps.

Revenons sur terre pour retrouver les brouillards de mélange dans les « machines à brouillard » utilisées pour faire de la brume dans certains spectacles (voir la figure 3). Dans ces machines, un « jus à brouillard » est vaporisé et éjecté sous pression. Sa température est de l'ordre de 120°C, soit autant que dans une cocotte-minute, donc avec le même résultat que lorsqu'on retire la

soupe de ladite cocotte : le mélange avec l'air ambiant produit de la fumée.

Mais comment éviter la disparition rapide de ce brouillard lorsqu'il s'éloigne de son point d'éjection ? On utilise pour cela un mélange d'eau et de glycérine ou de propylène glycol, deux composés moins volatils que l'eau (et non toxiques, comme en témoigne leur emploi dans l'industrie alimentaire). L'évaporation des gouttelettes en est fortement ralentie et le brouillard est beaucoup plus persistant. Il permet de rendre visibles les faisceaux des projecteurs dans les spectacles, de créer des ambiances au cinéma... Plus original, l'artiste néerlandais Berndnaut Smilde se sert de ces machines pour faire apparaître (après une méticuleuse préparation) un nuage plus vrai que nature au sein d'une pièce fermée, faisant ainsi du tableau *Le Poison* (1939) de René Magritte une réalité. ■



www.pourlascience.fr

**Restez en contact
avec l'actualité scientifique.**

Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web :

-  Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
-  Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourLaScience>
-  Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
-  Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
-  Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

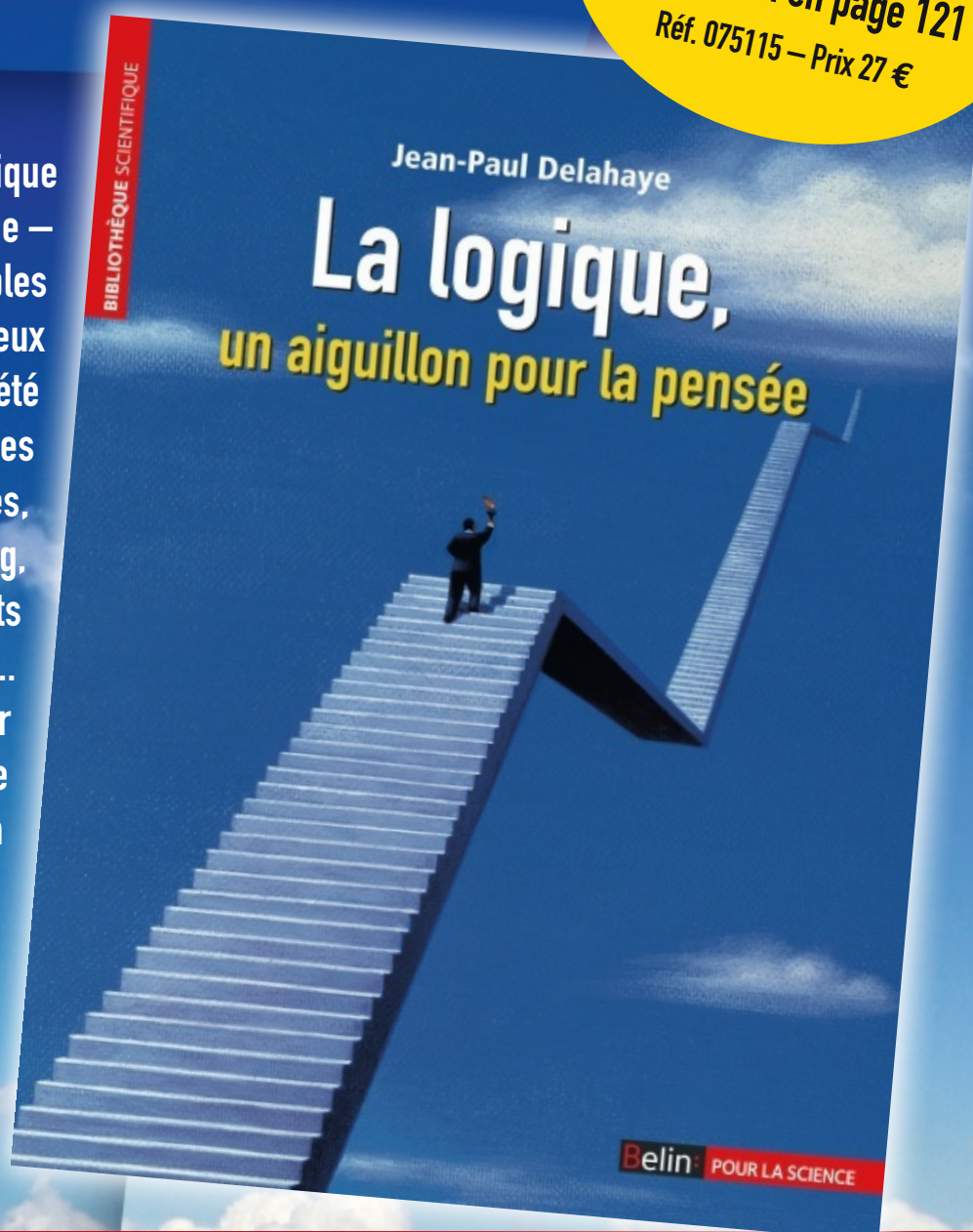
La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

Commandez ce livre
dès maintenant grâce
au bulletin en page 121
Réf. 075115 – Prix 27 €

La logique
— prise au sens large —
a connu d'incroyables
progrès depuis deux
siècles : l'infinie variété
des infinis, les étranges
hyperensembles,
l'indécidabilité de Turing,
les déconcertants
paradoxes probabilistes...
Cet ouvrage sur
la logique moderne
des sciences intéressera
autant mathématiciens
que philosophes et curieux,
intrigués par le monde
abstrait des raisonnements !

Éditions Belin/Pour la Science 2012
200 pages — 27 euros — ISBN 978-2-8424-5115-8



Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr/librairie