



Une nuée d'étourneaux, photographiée par Søren Solkær.

quel membre du groupe peut commencer un déplacement qui se propage ensuite à ses voisins à la façon d'une onde. Ce comportement est comparable à celui d'une ola dans les tribunes d'un stade.

En 1995, Tamás Vicsek, de l'université Eötvös-Loránd, à Budapest, est parvenu à modéliser ce mouvement collectif. Seuls deux paramètres suffisent à en rendre compte. D'abord, un étourneau a tendance à aligner son déplacement et sa vitesse avec ceux de ses voisins les plus proches. Ensuite, un oiseau a une propension à se rapprocher de ces mêmes voisins tout en maintenant une distance minimale. Ces deux éléments – l'alignement et la cohésion – sont quantifiables, et en faisant varier leurs valeurs on peut simuler et étudier de nombreux types de mouvements collectifs, pas seulement

celui des étourneaux. À l'aide de ce modèle, Hugues Chaté, du CEA à Gif-sur-Yvette, et Guillaume Grégoire, de l'université de Paris, ont ainsi reproduit le déplacement de bactéries dans un film liquide, le comportement d'un banc de poissons, et même un phénomène de ségrégation cellulaire qui a lieu par exemple lors de la régénération d'une hydre d'eau douce.

Étonnamment, les informaticiens des studios d'animation avaient déjà obtenu de façon empirique ce modèle: il est à la base des scènes de foules, comme la migration des gnous dans *Le Roi Lion*, de Disney, sorti en... 1994.

La nuée a-t-elle une utilité pour les étourneaux? Il semble que oui, car en présentant une masse plus ou moins compacte, ils décourageraient les prédateurs,

comme les faucons, qui hésiteraient à se risquer dans un nuage dense, où le risque de blessure est important. Mais malheur aux oiseaux restés à l'écart!

Mieux vaut pour eux suivre ce qu'avait dès 1869 décrit Isidore Ducasse, comte de Lautréamont, dans *Les Chants de Maldoror*: «C'est à la voix de l'instinct que les étourneaux obéissent, et leur instinct les porte à se rapprocher toujours du centre du peloton, tandis que la rapidité de leur vol les emporte sans cesse au-delà.» Au-delà, vers l'objectif de Søren Solkær, tendu vers ce qu'il nomme un «fragment d'éternité». ■



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LA BOUGIE DE LAVOISIER

Depuis des siècles, une expérience de «physique amusante» suscite régulièrement des interprétations variées. Pourtant, il y a 250 ans, Antoine Lavoisier avait donné la bonne explication.



Posez une bougie allumée sur une jatte dont le fond est rempli d'eau. Recouvrez-la avec un grand récipient en verre jusqu'à ce que le bord de ce dernier trempe bien dans l'eau. Après quelques secondes, la flamme de la bougie s'affaiblit puis s'éteint, tandis que l'eau est aspirée dans le récipient et remonte jusqu'à le remplir environ au cinquième de son volume (si l'eau est assez abondante).

Plusieurs pistes sont généralement invoquées pour expliquer ce phénomène : disparition du dioxygène de l'air en raison de la combustion (une «explication» très répandue), dissolution du dioxyde de carbone produit, ou encore diminution du volume de l'air chaud,

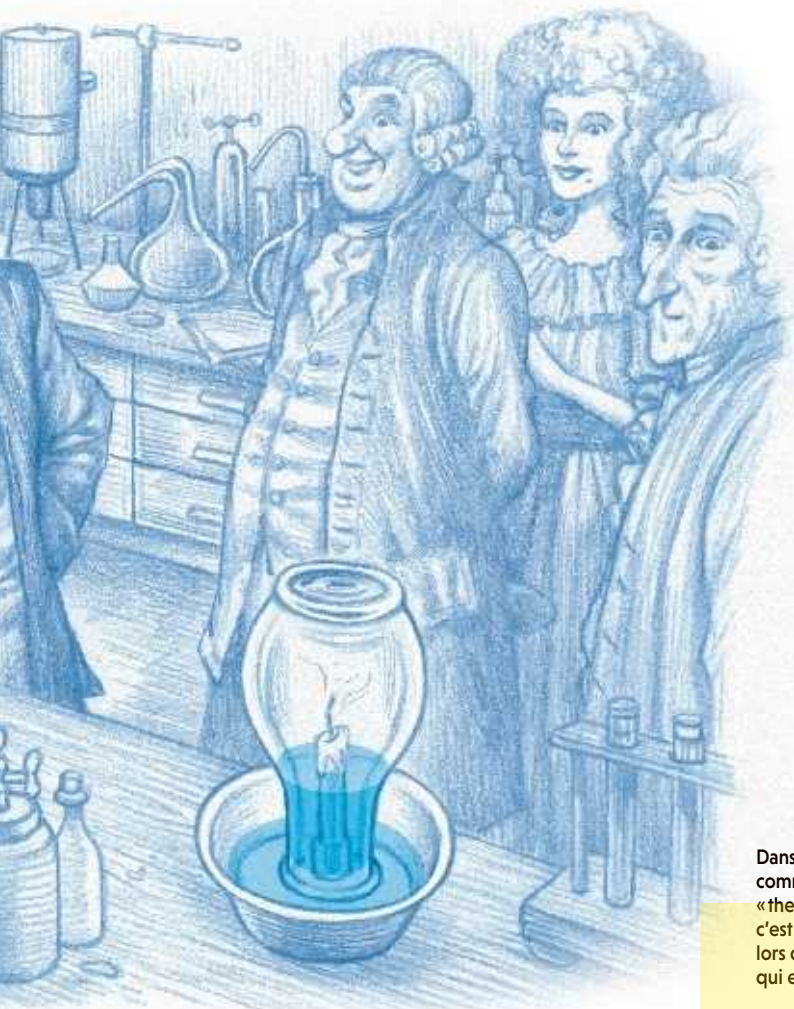
etc. De récentes et soigneuses expériences confirment l'interprétation du chimiste français Antoine Lavoisier et écartent les autres : lorsqu'on recouvre la bougie avec le récipient, de l'air chaud se trouve emprisonné ; en se refroidissant une fois que la bougie est éteinte, cet air se contracte, ce qui provoque la montée de l'eau.

LE THERMOSCOPE, UNE EXPÉRIENCE MILLÉNAIRE

Reprenons l'histoire à son commencement, il y a plus de 2000 ans. Les premières traces écrites de cette expérience datent en effet de 300 avant notre ère. Le scientifique et ingénieur Philon de Byzance l'a décrite dans ses *Pneumatica*, et expliquait la réduction du volume

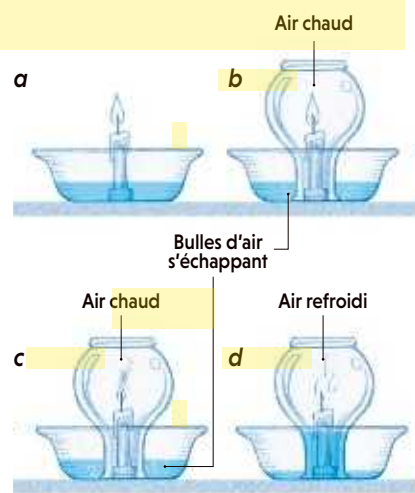
d'air présent en invoquant la théorie des quatre éléments (air, eau, feu, terre). Pourtant, Philon avait compris que la dilatation et la contraction thermiques de l'air se manifestaient dans le «thermoscope», un appareil présentant le même effet.

Cet instrument, dans sa version popularisée par Galilée, consiste en un petit flacon de la taille d'un œuf de poule, muni d'un col très long et fin comme une paille. L'expérimentateur chauffe ce flacon et l'air qu'il contient en saisissant le récipient entre ses mains ; puis il le renverse et plonge l'ouverture dans de l'eau. Quand il enlève ses mains et que le flacon et l'air qu'il contient refroidissent, l'eau monte rapidement dans le col. Ce phénomène



DILATATION PUIS CONTRACTION DE L'AIR

Lorsque la bougie brûle, l'air qui l'environne s'échauffe, donc se dilate. À moins de réaliser l'expérience avec soin, en plongeant le récipient renversé dans une profondeur d'eau suffisante, des bulles d'air s'échappent alors (b, c). La quantité d'air présente dans le récipient renversé se voit alors réduite, et lorsque cet air se refroidit après l'extinction de la flamme, son volume diminue (d). C'est ce qui fait monter l'eau.



Dans l'expérience de la bougie comme dans celle du «thermoscope» (à gauche), c'est la contraction de l'air, lors de son refroidissement, qui explique la montée de l'eau.

s'explique aujourd'hui aisément, sachant qu'une variation de 3 °C de la température d'un gaz provoque une variation de volume d'environ 1% (aux alentours de la température ambiante).

Quant à l'expérience de la bougie, la bonne interprétation est venue avec le «Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique et dans l'air éminemment respirable», d'Antoine Lavoisier. En deux phrases lumineuses, tout est dit: «Presque tous ceux qui se sont occupés d'expériences sur la combustion des chandelles ou bougies se sont persuadés qu'il se faisait une diminution considérable du volume de l'air pendant la combustion. [...] Mais on n'a pas fait attention qu'on ne peut placer un récipient sur une bougie sans que l'air

du récipient soit échauffé dans l'instant même où on le place sur la platine; et avant qu'on l'ait appliqué sur la platine; c'est donc de l'air chaud qu'on enferme sous la cloche: or de l'air chaud diminue de volume en se refroidissant.»

ÉCHAPPÉE DE BULLES D'AIR

Lavoisier a aussi constaté que, suite à son échauffement par la flamme de la bougie, le volume de l'air sous la cloche augmente avant de diminuer. Si l'on se contente de poser sans précaution un récipient au-dessus d'une bougie enflammée posée dans une soucoupe par exemple, cette augmentation de volume force l'air à s'échapper en faisant des bulles que l'on observerait si l'on y prêtait plus attention.

Conclusion: quand on réalise l'expérience sur un coin de table, on ne contrôle pas vraiment la quantité d'air dans le récipient ni sa température. Pour garantir que l'air ne s'échappe pas, il suffit de réaliser l'expérience dans un récipient profond rempli avec plusieurs centimètres d'eau, de telle sorte que lorsqu'on renverse complètement la cloche dans l'eau, elle soit immergée dans une hauteur d'eau suffisante. Et pour s'assurer que l'air enfermé sous la cloche soit à température ambiante, il faut que le volume d'air soit clos avant d'allumer la mèche de la bougie!

C'est ce qu'a réalisé Joseph Priestley, le concurrent de Lavoisier, en enfermant sous la cloche plongée dans du mercure une bougie non allumée puis en >

> enflammant la mèche avec les rayons du soleil concentrés par une lentille. Lavoisier réalisera une variante dans laquelle il placera du phosphore à côté de la mèche et qu'il allumera à l'aide d'un fer chaud amené à travers le mercure.

Dans une version plus moderne de l'expérience, rapportée en 2011, Francisco Vera et deux collègues, de l'université catholique de Valparaíso, ont allumé la mèche en faisant passer un courant électrique (voir l'encadré ci-contre). La conclusion est sans appel : dans ces conditions, le volume d'air varie de moins de 1% entre le début et la fin de l'expérience, comme s'il ne s'était rien passé pour l'air, sinon s'échauffer et se dilater avant de retrouver la température ambiante et son volume initial.

LA CHIMIE TROUBLE LE JEU

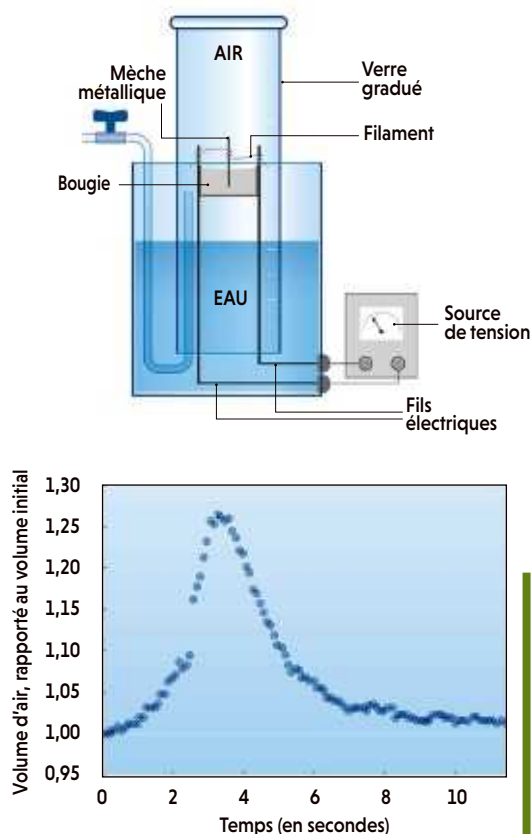
Cela a de quoi nous désorienter, car il y a bien une réaction chimique : la combustion de la paraffine de la bougie, vaporisée par la chaleur et réagissant avec le dioxygène de l'air. Cette réaction s'écrit : $C_{25}H_{52} + 38 O_2 \rightarrow 25 CO_2 + 26 H_2O$, ce qui signifie que pour 38 molécules de dioxygène consommées, on produit 25 molécules de gaz carbonique et 26 molécules d'eau. Or le dioxygène constitue, en volume, 21% de l'air atmosphérique : s'il était entièrement consommé lors de la combustion de la flamme, ce que suggère d'ailleurs l'extinction de la bougie, nous obtiendrions, par proportionnalité, 13,8% ($21\% \times 25/38$) du volume initial sous forme de gaz carbonique et 14,4% sous forme de vapeur d'eau. On peut considérer que toute la vapeur d'eau se condense, mais qu'advient-il du dioxyde de carbone ? Des expériences complémentaires montrent que sa dissolution dans l'eau est négligeable, et il devrait donc y avoir, finalement, une réduction de 7% du volume total. Pourquoi n'est-ce pas le cas ?

Nous avons supposé que la réaction était complète. Or, lorsque la flamme s'éteint, seulement 60% de l'oxygène a été en réalité consommé. Ainsi, lors d'une expérience quantitative réalisée avec une feuille de papier, la masse de celle-ci a été choisie pour que sa combustion complète nécessite exactement la quantité d'oxygène présente sous la cloche. Cette feuille n'a brûlé qu'à moitié.

Pourquoi cette combustion incomplète ? Au fur et à mesure de la combustion, la quantité d'oxygène présente diminue ; la réaction ralentit donc et, avec elle, la chaleur produite. Vient un moment où la température de la flamme et la quantité

UNE EXPÉRIENCE PROBANTE

Dans l'expérience réalisée par Francisco Vera et ses collègues, le récipient cylindrique est renversé et plongé dans une profondeur suffisante pour empêcher l'air de s'échapper (préalablement, le robinet du petit tube est ouvert, ce qui permet à l'eau de rentrer partiellement dans le récipient ; il est ensuite fermé). La mèche de la bougie est constituée d'un très fin tube d'acier inoxydable, et est allumée en faisant passer un courant électrique dans un filament métallique. Ainsi, le volume d'air reste clos pendant toute l'expérience. Dans ces conditions, on constate que ce volume commence par augmenter (en raison de l'échauffement de l'air), puis diminue (en raison du refroidissement) jusqu'à retrouver quasiment sa valeur initiale.



d'oxygène présente localement ne suffisent plus pour entretenir la réaction, qui s'arrête d'elle-même. C'est ce que l'on observe avec la bougie.

Dans les premières secondes, la flamme est très lumineuse et la combustion est totale, puis cette luminosité diminue et l'on voit de la fumée noire s'élever : la réaction est incomplète, elle produit du carbone sous forme de suie, et aussi du monoxyde de carbone. Enfin, la flamme s'éteint et un peu de paraffine continue à s'évaporer de la mèche chaude. Cette consommation d'une partie seulement de l'oxygène et la production de monoxyde de carbone (qui ne nécessite qu'un atome d'oxygène au lieu de deux) expliquent pourquoi la réduction observée du volume est très inférieure aux 7% prévus pour une combustion totale... Mais quand on effectue sans précaution l'expérience, l'effet thermique s'impose : une variation moyenne de température de 60 °C de l'air suffit pour provoquer la variation observée de un cinquième de son volume. ■

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



BIBLIOGRAPHIE

F. Vera et al., **Burning a candle in a vessel, a simple experiment with a long history**, *Science & Education*, vol. 20(9), pp. 881-893, 2011.

E. Vitz, **Paradoxes, puzzles, and pitfalls of incomplete combustion demonstrations**, *Journal of Chemical Education*, vol. 77(8), p. 1011, 2000.

A. Lavoisier, **Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique, et dans l'air éminemment respirable**, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1777, p. 195.

Vidéo sur Merci la Physique : <https://youtu.be/bB9Onj7ct2Q>