

> 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

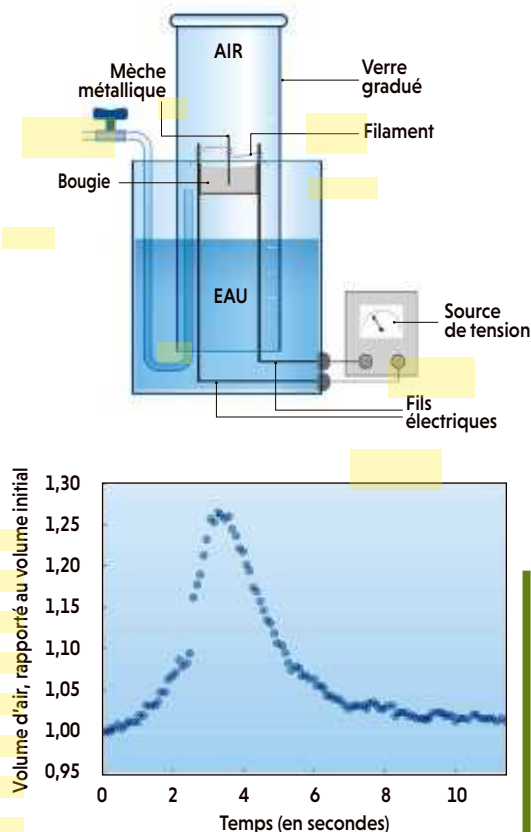
Cela a de quoi nous désorienter, car il y a bien une réaction chimique : la combustion de la paraffine de la bougie, vaporisée par la chaleur et réagissant avec le dioxygène de l'air. Cette réaction s'écrit : $C_{25}H_{52} + 38 O_2 \rightarrow 25 CO_2 + 26 H_2O$, ce qui signifie que pour 38 molécules 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>



JE DÉPANNE
À DISTANCE
POUR QUE
RIEN NE
S'ARRÊTE.
SURTOUT
PAS LA VIE
COURANTE.

©Brice Portolano

Émilie est Agent de Conduite Réseau à Ormes (45).

Émilie pilote en temps réel le réseau électrique pour en garantir la fiabilité. Avec Émilie, Enedis sécurise l'exploitation d'un réseau électrique toujours plus agile et connecté. **C'est ça, le service public de la transition écologique dans les territoires.**

Retrouvez-nous sur www.enedis.fr

ENEDIS
L'ELECTRICITE EN RESEAU

L'énergie est notre avenir, économisons-la !