

# Le feu, la combustion

Primaire et collège

## Résumé

Tous les animaux ont peur du feu, excepté l'homme. Celui-ci, qui en a acquis la « maîtrise » depuis la Préhistoire, en tire des avantages énormes, notamment pour s'éclairer, se chauffer et cuire ses aliments. Il faut cependant attendre le XVIII<sup>e</sup>, et surtout le XIX<sup>e</sup> siècle pour que son utilité croisse considérablement avec la découverte des modes de production de l'énergie.

# le feu, la combustion

Marc Julia

## Importance du phénomène

Tous les animaux ont peur du feu, excepté l'homme. Celui-ci, qui en a acquis la « maîtrise » depuis la préhistoire, en tire des avantages énormes, notamment pour s'éclairer, se chauffer et cuire ses aliments. Il faut cependant attendre le XVIII<sup>e</sup> et, surtout, le XIX<sup>e</sup> siècle pour que son utilité croisse considérablement avec la découverte des modes de production de l'ÉNERGIE.

L'utilisation du feu s'est d'abord faite, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, dans des machines à vapeur qui ont rendu disponibles des quantités d'énergie sans commune mesure avec celles utilisées lorsqu'on ne disposait que de la force musculaire des êtres humains ou des animaux (la vitesse maximale des déplacements était alors celle d'un cheval au galop). À la fin de ce même siècle, un autre progrès notable fut l'invention du moteur à explosion ou à combustion interne. Sous des formes diverses, c'est aujourd'hui la principale source d'énergie utilisée pour le transport des personnes et des biens et le mode de fonctionnement d'innombrables moteurs. Au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, le moteur à réaction a pris une place considérable, et l'histoire n'est pas finie...

La signification du titre doit être explicitée. Le feu désigne le phénomène général ainsi

que les objets qui en sont le support, la combustion les phénomènes qui s'y déroulent. La combustion est une transformation de la matière, c'est-à-dire une transformation chimique qui produit lumière et chaleur. Ce phénomène a donné lieu à beaucoup d'études. Dans un exposé très simplifié, nous définirons les conditions d'apparition du phénomène – comment le faire démarrer et s'arrêter – et nous présenterons les résultats de l'observation simple. Après cela, nous verrons comment nous avons été conduits à faire des expériences.

L'approche expérimentale (qui a servi pour l'étude de nombreux phénomènes) vise tout d'abord à acquérir des informations sur le résultat global, l'énergie fournie. Nous étudierons ensuite d'aussi près que possible le déroulement du phénomène, en particulier du point de vue de la matière qui se transforme. La flamme d'une chandelle nous servira de modèle simplifié et commode.

Nous nous limiterons aux COMBUSTIONS dites « VIVES », mais d'autres formes de combustion dites « LENTES » seront cependant abordées : la CORROSION, la respiration-alimentation. Nous évoquerons aussi l'opération inverse, par laquelle on régénère l'OXYGÈNE et une substance combustible (du bois par exemple, cf la PHOTOSYNTÈSE p. 215).

## Que faut-il pour faire du feu ? Comment le fait-on démarrer et s'arrêter ?

Tout le monde sait que pour faire du feu, il faut quelque chose qui brûle, un *combustible*.

Les combustibles peuvent être classés selon leur origine : végétale (bois, alcool, papier, huile d'arachide), animale (beurre, suif, saindoux, huile de baleine) ou minérale. Le charbon, le pétrole – qu'on trouve dans la terre, comme les minéraux, mais qui sont d'origine vivante –, le gaz de ville, le gaz naturel sont également des combustibles. On les classe quelquefois en solides liquides et gazeux. Les substances non combustibles (les pierres, l'eau, le sable, la terre cuite) n'en sont pas moins intéressantes, ne serait-ce que parce qu'elles permettent de contenir le feu.

La différence (fondamentale, bien sûr) entre ces deux groupes est due à leur constitution même : les MOLECULES des corps combustibles sont riches en éléments – principalement le CARBONE et l'hydrogène –, qui se combinent volontiers avec l'oxygène de l'air par des réactions chimiques qui dégagent de la chaleur.

Cela nous permet déjà de comprendre pourquoi il faut, à côté du combustible – et ce n'est pas moins important –, de l'*air*. On l'appelle ici « comburant ». Tout le monde sait qu'un feu de bois ou même du papier trop tassé ne brûle pas bien et que pour

activer la combustion de bois ou de charbon, il faut augmenter la quantité d'air disponible avec des soufflets.

Deux gaz constituent ce mélange : l'oxygène (pour 20 %) et l'azote (pour 80 %). Seul le premier peut entretenir la combustion et est consommé ; par conséquent, la combustion s'arrête quand il n'y en a plus. On peut séparer ces deux constituants, par exemple en les liquéfiant d'abord (vers – 200° C), puis en les soumettant à la DISTILLATION FRACTIONNÉE, comme lorsque l'on sépare du vin l'alcool et l'eau dans les alambics. Cela se pratique sur une échelle énorme dans l'industrie. L'oxygène permettant des combustions beaucoup plus vives que l'air (la lumière émise est plus intense), il est très utilisé dans les chalumeaux et la métallurgie. L'azote, quant à lui, est principalement transformé en ammoniac par réaction avec l'hydrogène. On fabrique ainsi les engrais azotés qui ont contribué à augmenter considérablement le rendement des cultures.

Cependant, si l'on met ensemble un combustible et de l'air, il ne se passe rien (heureusement !). Il faut adjoindre une certaine quantité de chaleur, par exemple avec la flamme d'une allumette. Dans le cas de la bougie, une petite partie de la chaleur fournie par la combustion transformera, par la suite, la cire pour qu'elle puisse brûler (cf. pp. 212-216), comme dans une arme à répétition.



Après avoir disposé et allumé deux bougies, on coiffe l'une d'un grand bocal, l'autre d'un petit. La flamme s'éteint bientôt dans le petit bocal, nettement plus tard dans le grand. Plusieurs informations nous sont délivrées : en premier lieu, il faut de l'air ; ensuite, en mesurant les quantités de cire brûlée et d'air disparu, on dégage une relation de proportionnalité – ce qui est la situation normale dans les transformations de matière. Enfin, il reste du gaz et pourtant la bougie s'éteint ! Le gaz résiduel n'est en réalité plus capable d'entretenir la combustion (cf. pp. 212-216). Surtout, on constate que l'air qui a servi n'était pas un corps pur, mais un mélange dont une partie seulement a été consommée.



© John Warden/  
Cosmos

L'homme n'a pas tardé à domestiquer le feu, qui, à l'état « sauvage » peut ravager la nature (photo ci-contre). Entre autres utilisations salutaires, celle de pouvoir cuire ses aliments.

© John Kaprielian,  
Photo researchers,  
Inc./Cosmos



Mais avant d'allumer du feu, il faut savoir l'éteindre – ce qui est au moins aussi important ! Pour cela, il faut le priver de combustible ou bien – et c'est souvent plus facile – d'air. On pourra ainsi : pincer la flamme de la bougie avec les doigts mouillés, arroser, étouffer les flammes avec une couverture mouillée, etc. Les extincteurs à neige carbonique remplacent l'air autour du feu par un gaz inerte, incapable, à l'inverse de l'oxygène, d'entretenir la combustion (*cf.* p. 214).

Ces notions élémentaires permettent de comprendre comment « faire du feu sous l'eau » ou dans l'espace intersidéral (pour les fusées) : il faut apporter à la fois le combustible et le comburant.

Dans le cas de la poudre à canon ou des explosifs, l'oxygène nécessaire est apporté par un constituant (autrefois le salpêtre) qui en contient beaucoup sous une forme assez faiblement attachée pour pouvoir le céder au combustible. La poudre fabriquée par Lavoisier a ainsi contribué aux succès des armées révolutionnaires américaines et françaises à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle.

## Un modèle de combustion : la chandelle de Michael Faraday

À Londres, vers 1850, la Royal Institution organisait les « Conférences du vendredi soir ou de Noël » destinées à diffuser une formation scientifique aux enfants et au grand public non spécialiste. Dans une série restée célèbre, Michael Faraday (1791-1867) y racontait l'« histoire d'une chandelle », modèle d'approche expérimentale qui sera largement utilisé dans le présent chapitre (cf. pp. 218).

Pour s'éclairer, on eut d'abord recours à la torche de résine avant d'utiliser – progrès notable – la lampe à huile. On remplaça ensuite l'huile des lampes par un combustible solide : les chandelles étaient fabriquées avec des tresses de coton qu'on laissait pendre dans le suif fondu en les retirant plusieurs fois pour les laisser durcir. Si le résultat désiré était obtenu, le procédé demeurait sale. Les chandelles de luxe, faites avec de la cire d'abeille, plus propres, étaient cependant plus coûteuses. Par la suite, lors de ses études sur les corps gras, Chevreul obtint, par SAPONIFICATION, la stéarine blanche avec laquelle on fit, dès lors, les bougies : la science mettait ainsi le luxe à la portée de tous.

La mèche, quant à elle, ne sert pas seulement, dans la fabrication, à produire un cylindre de cire. Elle remplit une autre mission très importante : faire monter progressivement la cire liquide dans la flamme. Tout le monde a vu du café monter dans un morceau de sucre qu'on trempe dedans (on voit bien le café parce qu'il est noir, mais de l'eau monterait tout aussi bien) : ce phénomène s'appelle CAPILLARITÉ, car il se produit dans des tuyaux fins comme les cheveux ou – si l'on préfère – les crevasses (il y en a dans le sucre en morceaux). Les

agriculteurs savent que, par temps de sécheresse, « un binage vaut un arrosage » : l'eau du sous-sol monte plus facilement par capillarité à la surface (où elle s'évapore) dans la terre tassée, qui contient de très fins canaux, que dans la terre ameublie par le binage, où ces fins canaux ont été détruits. Un participant à la session a suggéré une très belle expérience : pourquoi ne pas disposer l'extrémité d'une autre mèche (en coton) dans la coupelle de cire fondue, pour allumer l'autre extrémité et réaliser ainsi une bougie à deux flammes ?

Au-dessus de la mèche, la flamme proprement dite est composée de deux parties très différentes d'aspect : un cône sombre en bas est surmonté par une partie brillante qui éclaire. Cela suscite nombre de questions que nous étudierons ci-dessous.

Cette flamme est entourée par le flux de gaz chauds dont nous avons parlé plus haut, entraîné par la CONVECTION (cf. « La physique du climat », pages 106-121). Conséquence inattendue, si l'on éclaire fortement une bougie allumée et que l'on observe son ombre portée sur un écran, on s'aperçoit qu'elle est rendue fort volumineuse à cause de ce cortège gazeux.

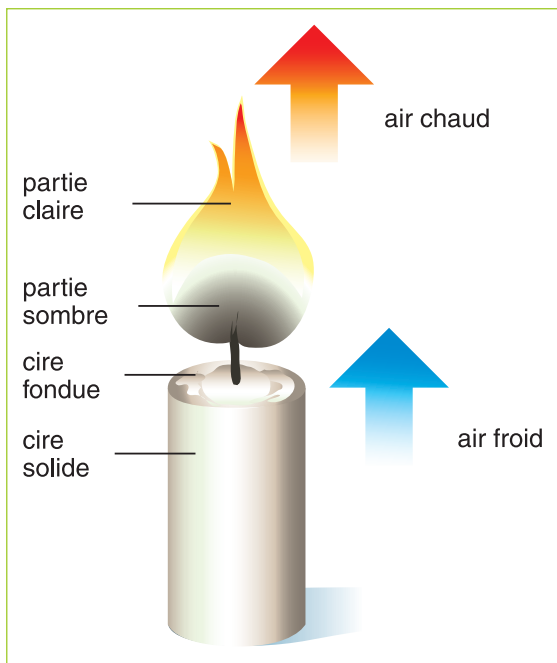
Encore au-dessus de la partie brillante, on distingue une fumée noire, d'autant plus importante que la mèche est plus longue.

## Aspects énergétiques. Pouvoir calorifique

Pour essayer de comprendre, il faut d'abord recueillir des informations. Celles-ci doivent être qualitatives et, si c'est possible, quantitatives. Pour le moment, concentrons notre attention sur le processus global ; nous verrons ensuite plus en détail le déroulement des opérations.

On distingue en haut de la colonne de cire solide une coupelle circulaire contenant de la cire liquide (fondue) que les rebords empêchent de couler. En plaçant la main (largement) au-dessus de la flamme, on sent un très fort courant ascendant de gaz chauds ; ce courant provoque un appel d'air froid qui monte tout autour de la bougie et maintient froide la cire qui constitue le rebord de la coupelle.

Lors de la combustion de la bougie, on voit bien que de la cire « disparaît ». Pour mesurer cette diminution, on pèse la bougie avant et après l'opération, ce qui permet d'obtenir, par différence, la quantité de cire consommée. Pour déterminer s'il y a une relation entre cette quantité et la quantité de chaleur produite, on utilise la chaleur pour chauffer une quantité d'eau préalablement mesurée et repérer la température de cette eau avant et après le chauffage (cf. l'expérience suivante).

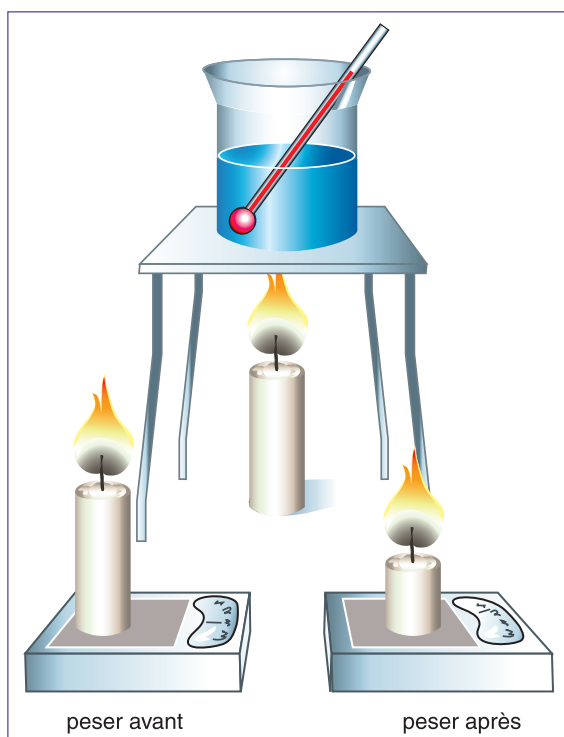


On pèse une bougie avant l'expérience, on la pèsera également après celle-ci, ce qui permettra de savoir quelle quantité de cire a été consommée.

On mesure en volume ou en poids ( $m$ ) une quantité d'eau dans un petit becher que l'on place avec un support au-dessus de la bougie. On y plonge un thermomètre et on repère la température initiale. On allume alors la bougie et on laisse chauffer en agitant doucement de temps en temps. Quand la température a nettement monté, on éteint la bougie et on note la température d'arrivée :  $dT$  est la différence avec la température initiale. On pèse la bougie (ce qu'il en reste) : la différence ( $m'$ ) avec la valeur initiale déterminée avant l'expérience donnera la masse consommée.

En pratique, on obtient avec 50 ml d'eau,  $15^\circ$  de différence de température, 0,38 g pour la différence de masse. La quantité de chaleur fournie par 0,38 g de cire est donc :  $50 \times 15 = 750$  cal. Par conséquent, un kilo de cire fournirait  $750 \times 1\,000/0,38 = 1\,970\,000$  cal, soit 1 970 kcal. S'il est clair que l'on a perdu une bonne part de la chaleur, qui a servi à chauffer l'air de la pièce, cette expérience très simple donne cependant un bon ordre de grandeur.

Vous pouvez réaliser des expériences avec des valeurs de  $m$ ,  $m'$  et  $dT$  différentes, vous trouverez à chaque fois que la valeur obtenue est indépendante de l'expérience. Elle est une propriété intrinsèque de la cire. On l'appelle le pouvoir calorifique.



Il est commode d'utiliser comme unité de quantité de chaleur la quantité nécessaire pour élever la température d'un millilitre (mL) (1cm<sup>3</sup>, ou, encore, 1g) d'eau de 1 °C : on l'appelle CALORIE (cal) – pour un kilo d'eau, il faudra naturellement mille fois plus, on parlera d'une kilocalorie (kcal). On peut admettre que la quantité de chaleur mise en jeu est proportionnelle à la masse d'eau et à la différence de température observée. On exprime souvent les quantités de chaleur en joules (1 cal = 4,18 J ; on utilise cette unité de mesure par convention internationale).

Le tableau ci-après donne les valeurs obtenues pour des combustibles usuels (les valeurs énergétiques de quelques aliments courants y ont été également portées, afin de souligner l'analogie entre combustion et alimentation, dont nous parlerons à la fin de ce chapitre).

bois	4 000	lait demi-écrémé	450
lignite	6 000	choucroute	1 000
anthracite	8 000	cassoulet	2 000
charbon de bois	7 000	saucisse de Strasbourg	3 300
fuel	10 000	céréales	3 800
alcool à brûler	5 000	biscottes	4 000
gaz de ville	9 000	beurre	7 200
hydrogène	30 000	Petit salé aux lentilles	1 300
		(cet aliment contient 75 % d'eau, par conséquent sa valeur calorifique lorsqu'il est sec est d'environ 5 200 kcal/kg)	

## Aspects matériels

Pour qui veut aller y regarder de plus près, deux difficultés se présentent : il risque de se brûler et ne peut, en outre, tout observer, les événements se déroulant trop vite !

Une très belle expérience de Michael Faraday illustre bien la méthode expérimentale : au lieu d'aller dans la flamme, on y

envoie un observateur chargé de nous renseigner. On prépare un tube de verre coudé dont on fait descendre verticalement une extrémité dans la flamme ; de cette manière, on prélève – en le déviant – le flux gazeux et on le soustrait à la suite des événements. On aura ainsi « arrêté » le phénomène à un certain stade de son déroulement. Cette technique, bien connue pour l'élaboration de l'acier, s'appelle le TREMPAGE. Le résultat obtenu est différent selon que l'on fait arriver l'ouverture du tuyau de verre dans le cône sombre ou dans le haut brillant de la flamme :

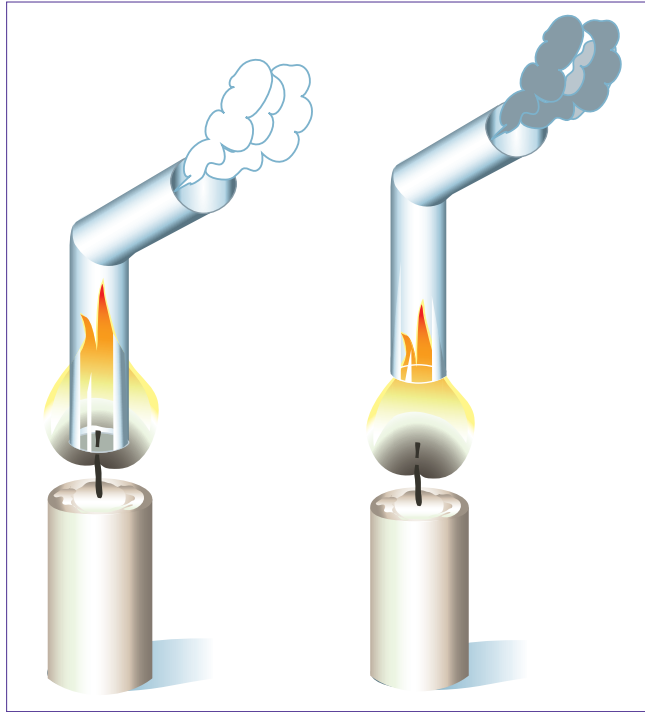
À propos de cette technique, qui illustre le prélèvement d'une fraction de la matière en train de se transformer, il convient de remarquer que si nous en avons profité pour savoir ce qui se passait, ou plutôt ce qui s'était passé jusque-là (autrement dit, pour comprendre l'opération), nous n'en avons pas pour autant arrêté le déroulement

de l'opération principale. Dans les fabrications industrielles, où il est avantageux de faire travailler les appareillages en continu – sans les arrêter après chaque opération –, il faut cependant suivre ce qui se passe pour pouvoir agir sur certains paramètres : température, vitesse d'écoulement, etc. Ces informations sont obtenues grâce à des capteurs placés dans le flux réactionnel qui mesurent la température, la composition, etc., du flux qui passe près d'eux. Elles sont ensuite transmises à des consoles dans une salle de commande d'où l'on peut conduire les opérations.

Si la bougie brûle bien, elle ne fait pas (ou peu) de charbon (cf. l'expérience ci-contre). Mais alors, que fait-elle ? Pour le savoir, il faut examiner les gaz qui s'élèvent au-dessus de la flamme. Une première indication est



Dans le cône sombre, quand le tuyau s'est échauffé, une fumée blanche sort à l'autre bout (figure de gauche). Si on la fait arriver dans un récipient froid, on voit alors se condenser une sorte de cire. (Quand le tuyau n'est pas encore chaud, cette cire se condense à l'intérieur et on ne voit rien sortir. On peut même l'allumer et faire apparaître une deuxième flamme.) D'ailleurs, quand on éteint une bougie, on aperçoit une fumée blanche qui s'élève de la mèche noire. Si l'on approche une flamme du haut de cette colonne de fumée, on peut rallumer la bougie à distance : cette « fumée » est en fait de la vapeur de cire. La mèche sert à vaporiser la cire, qui brûle bien mieux à l'état gazeux qu'à l'état solide ou même liquide, le contact avec l'air indispensable à la combustion étant bien meilleur.



Si, maintenant, on fait arriver le bas du tuyau de verre dans la partie supérieure brillante de la flamme, le résultat est très différent : cette fois-ci, c'est une fumée noire qui sort à l'autre bout du tuyau (figure de droite, ci-contre). Cette fumée est constituée de particules de charbon – on peut s'en rendre compte en regardant au plafond ou sur le fond d'un ballon plein d'eau froide qu'on aura présenté à ce flux gazeux. Quand ces particules sont dans la flamme, elles deviennent, par chauffage, autant de points lumineux, et elles sont tellement nombreuses qu'elles apparaissent comme une flamme continue. Ces points lumineux sont analogues aux étincelles qu'on voit se former au-dessus d'un feu de bûches. On peut en produire en projetant, dans une flamme chaude, de la poudre de lycopode (ou de charbon ou de fer), dont les grains deviendront autant de sources de lumière. Tous les corps chauffés à haute température deviennent lumineux (ne dit-on pas couramment chauffer au rouge sombre, au rouge vif, à blanc ?). C'est le principe même des anciens becs de gaz, dans lesquels un manchon de céramique était chauffé au gaz, ou actuellement de nos ampoules électriques dites à incandescence, dans lesquelles un filament de tungstène est chauffé par le courant électrique.

La transformation de la cire en charbon n'est pas un phénomène isolé. Tout le monde connaît la couleur que prend une tarte aux pommes (beaucoup) trop cuite. On fabrique le charbon de bois en chauffant du bois avec une quantité insuffisante d'air pour qu'il se consume complètement ; cette opération s'appelle la carbonisation. Dans le fonctionnement normal de la bougie, ces grains brûlent presque entièrement lors de leur trajet vers le haut de la flamme, sauf si le rapport vapeur de cire/air disponible devient trop grand. La bougie se met alors à fumer et il faut couper un peu de mèche pour réduire l'arrivée de cire.





donnée par la formation de buée au contact d'une paroi froide, par exemple le fond d'un ballon rempli d'eau glacée. On a pu déterminer qu'en brûlant, un litre d'huile donne à peu près un litre d'eau, ce qui est loin d'être négligeable. La combustion de quelques décigrammes de cire ne donnera évidemment pas beaucoup d'eau et celle-ci sera difficile à repérer, en particulier à cause du dépôt de charbon noir. Néanmoins, si l'on fait passer le flux gazeux dans un tube en U refroidi extérieurement par de la glace, on voit – si l'on attend suffisamment longtemps – se condenser de l'eau. En déterminant ses propriétés physiques ou chimiques, on peut prouver qu'il s'agit bien d'eau.

La cire, comme les produits dérivés du pétrole, est constituée principalement d'hydrocarbures formés par du carbone et de l'hydrogène, dans les proportions approximatives de 12 g de carbone pour 2 g d'hydrogène, ce qui correspond aux proportions atomiques (un ATOME de carbone pour deux d'hydrogène). Cet hydrogène, libéré par la chaleur, s'est combiné à l'oxygène de l'air pour fournir l'eau. On sait qu'une molécule d'eau est formée de deux atomes d'hydrogène attachés à un atome d'oxygène, ce qui lui fait attribuer la formule  $H_2O$  (2 g d'hydrogène et 16 g d'oxygène sont nécessaires à la formation d'une molécule d'eau [schéma ci-contre]).

Nous avons pu constater que du carbone se formait dans la flamme. Cependant, la majeure partie du carbone présent dans la cire est transformée en gaz carbonique, qu'on appelle aussi dioxyde de carbone (chaque atome de carbone étant attaché à deux atomes d'oxygène, on le représente par la formule  $CO_2$  linéaire). Il faut le distinguer du monoxyde de carbone  $CO$ , qui se forme dans les combustions avec un défaut d'air, peut encore brûler et est surtout très toxique.

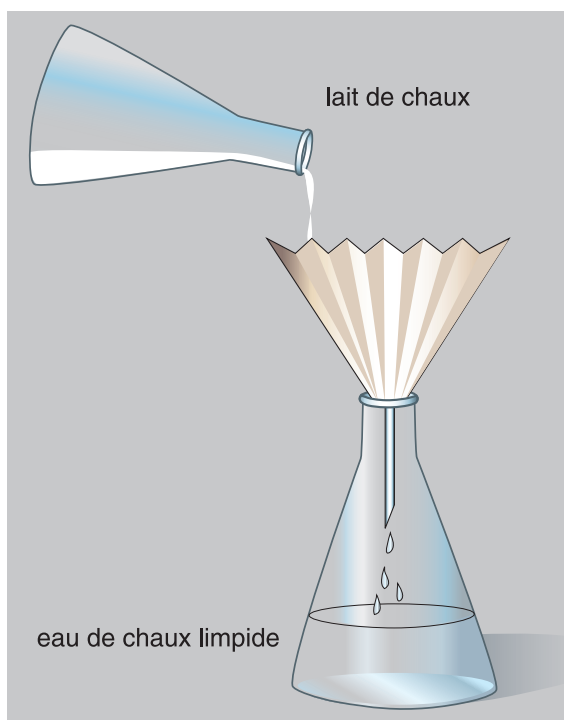
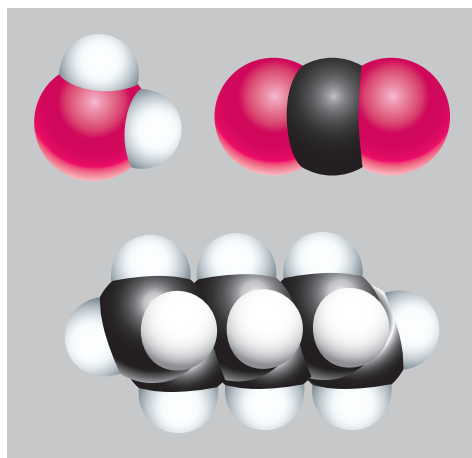
Le dioxyde de carbone n'est pas toxique, mais n'entretient pas la combustion. Il est beaucoup plus lourd que l'air. S'il se liquéfie assez facilement sous faible **PRESSION**, il n'est que faiblement soluble dans l'eau. On l'emploie dans les extincteurs dits « à neige carbonique » : quand on ouvre une de ces bouteilles métalliques contenant ce gaz liquéfié sous pression, la sortie du flot de gaz provoque un refroidissement considérable qui fait se solidifier une partie du produit sous forme de cristaux blancs.

La teneur en  $CO_2$  de l'air normal « pur » est de 3 pour 10 000, mais, dans l'air insuffisamment renouvelé, elle peut monter à 0,1 % c'est-à-dire 10 pour 10 000. De nos jours, notre mode de vie moderne nous conduit à brûler d'énormes quantités de combustibles carbonés et, par conséquent, à produire aussi naturellement d'énormes



Pour mettre en évidence le gaz carbonique, on utilise de l'eau de chaux. Celle-ci est obtenue à la suite d'un certain nombre d'opérations : par chauffage au rouge du calcaire (craie) dans les fours à chaux, le gaz carbonique se dégage ; reste la chaux vive, utilisée en particulier dans le bâtiment ( $CO_3Ca$  donne  $CO_2 + CaO$ ). Elle est ainsi dénommée car, si on y ajoute de l'eau, le mélange chauffe. On obtient alors la chaux éteinte. Celle-ci est un peu soluble dans l'eau. Une bouillie faite avec de l'eau s'appelle lait de chaux (on l'utilise pour peindre en blanc les murs des maisons). Si l'on filtre cette bouillie, on obtient une solution limpide d'eau de chaux de concentration d'environ 1,3 g/l (cf. la figure ci-contre, en bas à gauche). C'est donc elle qui va nous permettre de mettre en évidence la présence de gaz carbonique. En effet, si on fait barboter un gaz contenant du  $CO_2$  dans cette solution limpide, elle se trouble immédiatement, car il se reforme du carbonate de chaux (craie), très peu soluble. Les gaz qui montent de la bougie ont cette propriété et on peut confirmer qu'il s'agit bien du dioxyde de carbone (cf. la figure ci-contre, en bas à droite).

en noir = atome de carbone ; en rouge = atome d'oxygène ; en blanc = atome d'hydrogène.  
Modèles de molécules : eau =  $H_2O$  ; gaz carbonique =  $CO_2$  ; hexane =  $C_6H_{12}$ .



quantités de ce  $CO_2$ . On le rend responsable – au moins partiellement – de l'« EFFET DE SERRE », par lequel la température de l'atmosphère terrestre s'élève. Cela pourrait s'avérer dangereux si les calottes polaires se mettaient à fondre...

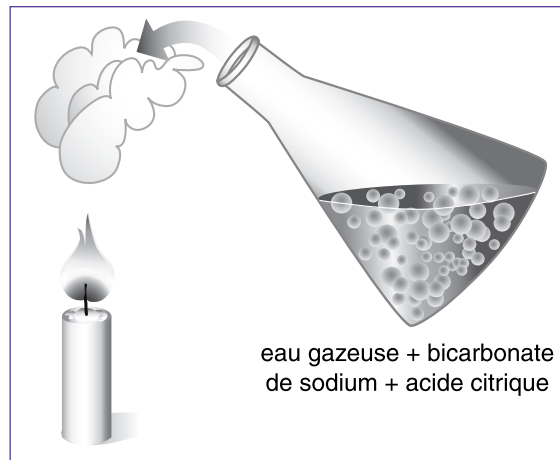
Cette teneur en  $CO_2$  est, en temps « normal », maintenue à peu près constante, en particulier par l'intermédiaire des plantes vertes. Celles-ci peuvent, grâce à l'énergie lumineuse, transformer le gaz carbonique en oxygène et en carbone sous une forme utilisable pour leur croissance. On appelle ce phénomène le « cycle du carbone ».

Résumons ce que nous avons appris sur les chandelles par l'observation et un peu d'expérimentation :

Un peu de l'énergie produite par la combustion sert à fondre la cire. La mèche sert à pomper la cire fondue jusque dans la flamme. Dans le bas de la flamme (partie foncée), cette cire est vaporisée et la vapeur va être PYROLYSÉE pour donner du carbone et de l'hydrogène. Les granules de carbone chauffés donnent la lumière, puis sont oxydés en dioxyde de carbone. L'hydrogène de la stéarine se combine à l'oxygène de l'air pour former de l'eau.



Vous pouvez également traiter la craie avec du vinaigre pour en séparer le gaz carbonique : le dégagement gazeux sera, là aussi, observable. De même, pour fabriquer un  $\text{CO}_2$  propre à la consommation pour les boissons gazeuses, on met en suspension, dans de l'eau, du bicarbonate de sodium pur et on y ajoute de l'acide citrique (tous deux achetés en pharmacie) pour obtenir de la limonade. Suivant les concentrations, le gaz carbonique reste DISSOUS dans l'eau ou se dégage en « faisant des bulles ». Si vous « versez » le gaz lourd qui se forme sur la flamme d'une bougie, vous la verrez s'éteindre.



## Combustions lentes, corrosion et respiration-alimentation

Il faut rapprocher des combustions vives d'autres phénomènes qui, s'ils ne donnent pas d'émission notable de lumière ou de chaleur, leur sont étroitement apparentés.

L'oxydation du fer à l'air humide le transforme en rouille. Cette opération consomme de l'oxygène.

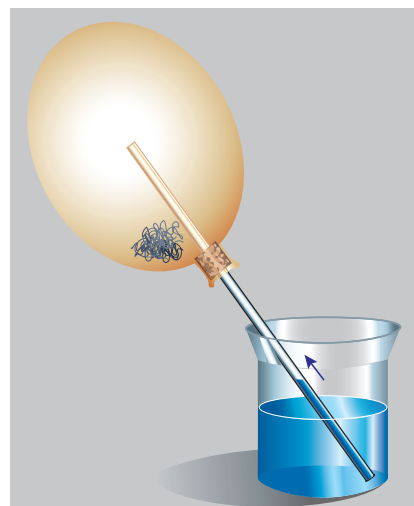
Ce phénomène, qu'on appelle corrosion, est bien évidemment d'une importance fondamentale pour l'usage des objets et des constructions métalliques. La rouille est un oxyde de fer, sa formation se révèle analogue à celle du dioxyde de carbone (des atomes d'oxygène se lient aux atomes de fer), mais, à la différence de ce dernier, qui se dégage, la rouille n'est pas volatile et reste sur le fer non encore oxydé. Cependant, elle n'a aucun

effet protecteur : le morceau de fer rouille complètement. Certains métaux subissent une oxydation analogue de leur surface, mais le produit formé (par exemple, l'alumine dans le cas de l'aluminium) protège le reste du métal. D'autres enfin, comme l'or, ne sont pas altérés.

Les opérations de la métallurgie ont souvent pour principe de séparer les métaux de l'oxygène qui y était attaché dans le minerai (qui est souvent un oxyde). C'est en somme l'inverse de la combustion, on l'appelle réduction. Dans les hauts-fourneaux, on utilise du charbon pour détacher l'oxygène du fer des oxydes de fer. En effet, le carbone



Après avoir introduit dans un ballon une petite quantité de laine de fer (du type « tampon Jex »), fermez-le avec un bouchon traversé par un tube en verre. Disposez l'extrémité ouverte du tube dans un récipient contenant de l'eau à laquelle vous aurez ajouté un colorant (permanganate de potassium...). Au bout de quelques minutes, le niveau de l'eau s'élève dans le tube. Du gaz a donc été consommé : l'oxygène de l'air s'est uni au fer. La pression à l'intérieur du ballon a diminué. Si vous attendez suffisamment longtemps, vous verrez la laine de fer se recouvrir de rouille.



ayant une plus grande affinité que le fer pour l'oxygène – celui-ci préférant y être attaché plutôt qu'au fer –, il se forme des oxydes de carbone et le fer métallique est libéré.

Une autre opération essentielle pour les êtres vivants, la respiration/digestion, ressemble aussi beaucoup à une combustion (cf. « Le corps humain », pages 411-423). En effet, toutes deux :

- consomment de la matière : combustibles ou aliments ;
- nécessitent de l'air ;
- produisent de la vapeur d'eau qu'on peut condenser (pour la respiration, pensez à la buée en hiver) ainsi que du gaz carbonique (si vous respirez plusieurs fois le même air, la concentration en  $\text{CO}_2$  se fait telle que cet air devient impropre à la respiration).

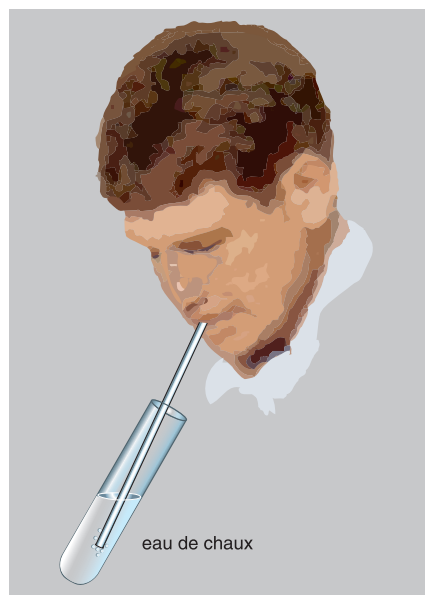
Les quantités en cause sont considérables. On a mesuré et calculé qu'une personne humaine normale rejetait dans l'atmosphère, sous forme de gaz carbonique, l'équivalent de 200 g de carbone par jour ;



Si vous faites passer de l'air pur à travers de l'eau de chaux, elle n'est pas modifiée ; si vous soufflez de l'air qui a été respiré, vous la verrez se troubler : l'air expiré est chargé de gaz carbonique.

soit, pour les 10 millions de personnes de l'agglomération parisienne, environ 2 000 t !

Comme pour la corrosion du fer, la « combustion » des aliments se fait à température modérée ( $37^\circ\text{C}$ ), bien qu'elle les transforme, comme la combustion vive de la cire, en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ . Ce phénomène est possible grâce à l'action des ENZYMES qui facilitent énormément ces opérations (et bien d'autres).



## Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

### Vivant et combustion sont-ils indissociables ?

Vivant et combustion sont indissociables, car il faut compenser les pertes en énergie dues à la différence entre les températures interne et externe, à la production de travail, etc. Prenez le simple exemple d'un moteur à explosion : on n'imagine pas qu'il puisse fournir du travail sans consommer du carburant qui y brûle...

### Pourquoi certaines combustions vives font-elles des flammes et d'autres pas ?

Certains corps brûlent directement en se combinant à l'oxygène de l'air, on ne voit pas de flamme : le charbon anthracite en est un exemple. D'autres corps sont, par la chaleur de leur propre combustion, transformés en composés volatils (gaz), qui s'échappent et brûlent en dehors du composé initial, on voit alors des flammes. Si le composé combustible est déjà gazeux ou gazéifié, on ne voit qu'une flamme (c'est ce qui se passe dans les chalumeaux ou les moteurs à réaction).

## Comment les bactéries anaérobies (sans air) font-elles pour faire des fermentations : comment font-elles des combustions sans air ?

Toutes les transformations de la matière mettent en jeu de l'énergie : elles en produisent ou en consomment. Cela se vérifie toujours, même dans le cas de transformations qui ne mettent pas en jeu de l'oxygène et qui peuvent néanmoins très bien fournir de l'énergie. Par exemple, le GLUCOSE peut « brûler » complètement pour donner de l'eau et du gaz carbonique :

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$  ; mais il peut aussi, dans les fermentations, brûler incomplètement sans apport d'oxygène pour donner un peu de gaz carbonique et de l'alcool éthylique :  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5O$ . Dans les deux cas, on retrouve naturellement dans le second membre de l'équation tous les atomes présents dans le premier.

On comprend qu'il faille transformer beaucoup plus de glucose dans le second cas que dans le premier pour produire la même quantité d'énergie. C'est une des raisons pour lesquelles les micro-organismes qui travaillent ainsi doivent consommer des quantités d'aliments qui nous paraissent énormes par rapport à leur poids.

## Quel type de combustion s'opère dans un moteur à essence ?

Dans un moteur à essence dit « à combustion interne », le combustible essence est vaporisé avec de l'air dans le carburateur (comme un parfum dans un vaporisateur) et injecté dans la chambre du cylindre. Une étincelle produite par la bougie allume alors le mélange qui brûle. Les gaz très chauds qui se sont formés poussent le piston jusqu'en bout de course ; il revient ensuite en arrière. Ce mouvement de va-et-vient est transformé par une bielle en un mouvement de rotation qui est ensuite transmis aux roues.

## Quelle est la différence entre catalyse et pyrolyse ?

Nous avons vu dans le texte ce qu'était la pyrolyse. Le terme « catalyse » a un sens complètement différent. Il s'agit de l'action de certaines substances qui rendent beaucoup plus faciles les transformations d'autres substances. Par exemple, les gaz qui sortent des moteurs à explosion contiennent des substances indésirables qui subsistent, bien qu'il y ait « tout ce qu'il faut » pour les transformer en substances inoffensives. Les catalyseurs permettent cette transformation. De même, l'action des enzymes lors de la digestion des aliments permet-elle de les « brûler » avec l'oxygène de la respiration à une température beaucoup plus basse que si on les faisait brûler dans un brûleur.

## Pourquoi le bois brûle-t-il ?

De même que la cire de la bougie est pyrolysée en gaz combustible, le bois brûle parce qu'il est transformé par sa propre combustion en gaz qui se combinent à l'air et dégagent de la chaleur. Si on chauffe du bois à l'abri de l'air, on peut recueillir les gaz et les utiliser, pour faire marcher un moteur à explosion par exemple. C'est ce que l'on faisait avec les gazogènes. Dans les « usines à gaz », du charbon gras est pyrolysé en grande quantité afin de fournir en gaz toute une ville, y compris les « becs de gaz » de l'éclairage public.

## Bibliographie

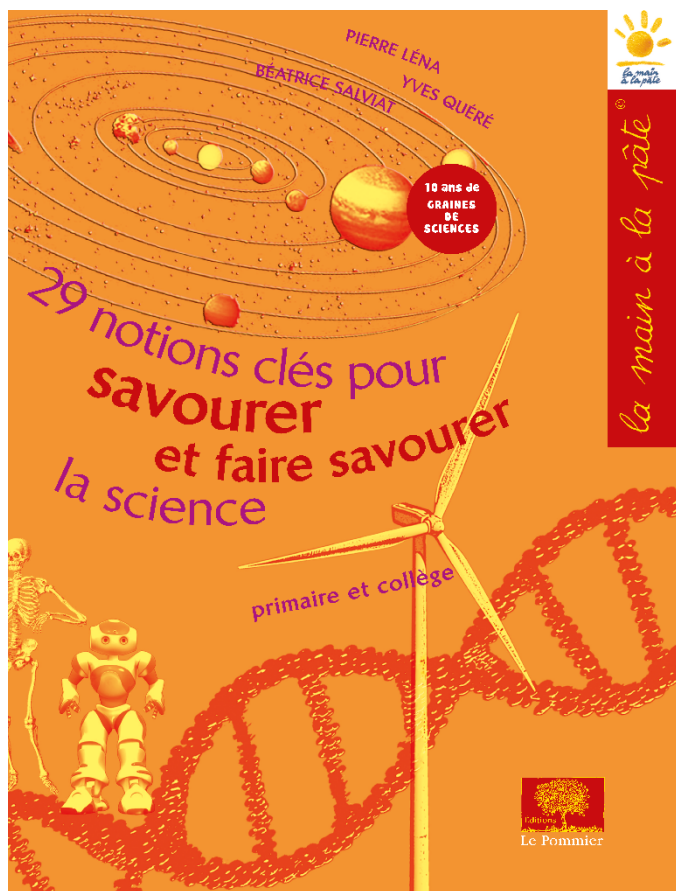
*The Natural History of a Candle*, Michael FARADAY, John Murray, Londres, 1861 ; trad. fr. H. Sainte-Claire Deville, Paris, Hetzel, 1865.

On doit à Faraday des découvertes aussi importantes que l'électrolyse (la coupure par l'électricité des liaisons entre atomes),

les dynamos (qui transforment l'énergie mécanique en électricité) ou les moteurs électriques (qui réalisent la transformation inverse).

*Premières scientifiques*, Bordas, coll. « Galileo », 1994. On y décrit la mesure du pouvoir calorifique d'une bougie.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



## Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



### Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes  
75006 Paris  
01 85 08 71 79  
contact@fondation-lamap.org

Site : [www.fondation-lamap.org](http://www.fondation-lamap.org)

 FONDATION  
**La main à la pâte**  
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE