



Frédéric Elie on
ResearchGate

Combustion d'une bougie

Frédéric Elie
novembre 2005

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Quelques expériences relatives à la combustion des bougies... celle-ci met en jeu principalement la réaction de l'acide stéarique avec l'oxygène. Une évaluation quantitative expérimentale de la chaleur molaire de combustion est également présentée.

Malgré son apparence « élémentaire » la combustion d'une bougie offre des aspects instructifs :

- pourquoi faut-il une mèche ? quelles sont les différentes parties de la flamme ?
- quelle réaction chimique est mise en jeu ? quels produits résultent de la combustion et comment les mettre en évidence ?
- dans quelles conditions la combustion est-elle maintenue ou au contraire arrêtée ?
- quel est le bilan énergétique de la combustion d'une bougie ?
- pourquoi les flammes de bougie oscillent-elles parfois ?
- etc...

SOMMAIRE

- 1 - Manipulation n°1 : allumer une bougie
- 2 - Manipulation n°2 : produits de combustion d'une bougie
- 3 - Manipulation n°3 : pour que la combustion s'entretienne
- 4 - Manipulation n°4 : chaleur de combustion d'une bougie
- 5 - Quelques mots sur la stéarine et les bougies

1 - Manipulation n°1 : allumer une bougie

Commençons alors par examiner une bougie et son allumage.

Une bougie est constituée d'un bâton de cire solide qui enserre une mèche. Approchons une allumette de la cire seule : celle-ci fond mais il n'y a pas de combustion. Pour qu'il y ait combustion il faut que la cire, à l'état liquide, soit vaporisée et que la vapeur soit confinée de manière à rester chaude, à une température suffisante pour maintenir la combustion. Cette condition est obtenue grâce à la mèche.

En effet, dans un premier temps la mèche brûle grâce à la flamme apportée par une allumette. En présence de chaleur la cire, au voisinage de la mèche qui brûle, fond et le liquide ainsi formé monte dans la mèche par capillarité. Il se vaporise sous l'action de la chaleur, mais le gaz chaud n'a pas le temps de se disperser dans l'atmosphère car la mèche, qui est chaude car imprégnée de cire chaude fondue, fait convecter l'air de bas en haut dans la zone confinée autour de la mèche et contenant la vapeur de cire. La réaction entre la cire et l'oxygène de l'air

peut donc s'effectuer sur et au voisinage de la mèche : il y a combustion.

Dans un deuxième temps, la source de chaleur de la mèche qui permet de maintenir la fusion de la cire, la montée du liquide et sa vaporisation, est celle de la combustion. D'ailleurs, sans la cire, la mèche ne brûlerait pas longtemps. Ainsi la combustion est auto-entretenu aussi longtemps que la cire liquide chaude qui imbibe la mèche est au contact de l'air. Si la mèche n'est plus assez longue ou qu'elle se recouvre de cire fondue plus froide, le contact n'est plus possible et la combustion s'arrête : c'est ce qui explique le comportement (un peu agaçant) d'une bougie que l'on n'arrive pas à maintenir allumée, lorsque sa mèche est trop courte et surpasse à peine de la cire fondue.

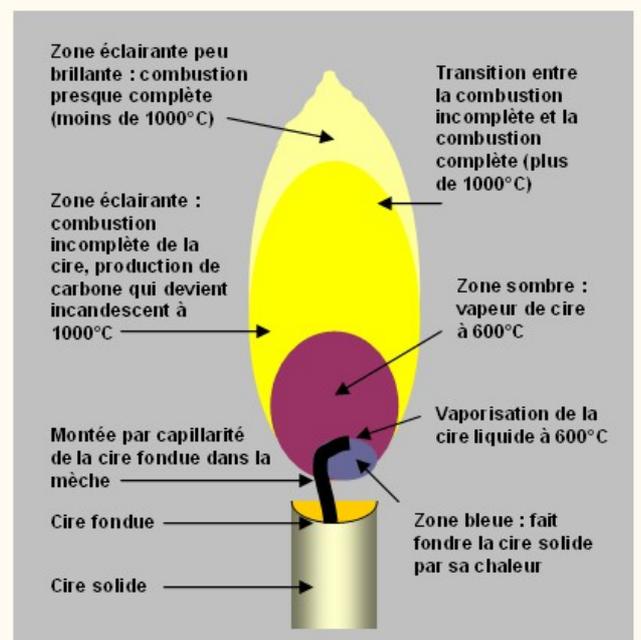
Observons maintenant la flamme d'une bougie. Nous constatons qu'elle présente différentes zones (voir photo et figure) :

- Une zone bleue à la base de la flamme : la cire vaporisée à 600°C depuis la mèche apporte suffisamment de chaleur à distance à la cire solide pour la faire fondre ;
- Une zone sombre : constituée de vapeur de cire, provenant de la cire liquide de la mèche, à une température de 600°C . Dans cette zone il n'y a pas de combustion, c'est pourquoi elle est sombre.
- Une zone éclairante : c'est la zone de combustion incomplète de la vapeur de cire. La combustion étant incomplète il reste du carbone qui n'a pas réagi avec l'oxygène de l'air. Ce carbone est porté à incandescence, d'où la lumière jaune. Température de cette zone : 1000°C .
- Une zone éclairante peu brillante : la combustion y est complète, toute la cire s'est transformée en dioxyde de carbone et en eau. La température est supérieure à 1000°C .
- Entre les deux zones brillantes, la frontière de transition entre la combustion incomplète et la combustion complète, marquant le passage d'un domaine peu riche en oxygène en un domaine plus riche.



flamme de bougie et ses différentes zones (photo : F. Elie)

- Oxygène de l'air ascendant
- Vapeur d'eau et gaz carbonique



Éteignons maintenant la bougie et observons.

La mèche encore chaude continue de faire vaporiser la cire liquide dont elle est imprégnée. Au contact de l'air plus froid cette vapeur se condense et donne l'aspect d'une fumée blanche. Près de la mèche la vapeur est encore suffisamment chaude pour que la quantité de chaleur nécessaire à la combustion soit moins élevée que dans le cas d'une mèche froide. Cette chaleur peut être apportée à distance par rayonnement thermique d'une allumette enflammée, sans besoin de lui faire toucher la mèche.

C'est bien ce qui a été constaté dans mon expérience suivante.



une fois la bougie éteinte, la cire vaporisée se condense dans les zones plus froides de l'air, à une certaine distance de la mèche (fumée blanche, elle ne touche pas la mèche)



on approche une allumette enflammée de la mèche : à deux ou trois centimètres d'elle, elle suffit déjà à la rallumer (point incandescent)



on rapproche encore la flamme de l'allumette ; noter la présence encore de la vapeur de cire condensée



la vapeur de cire condensée s'est dispersée ; la vapeur issue de la mèche ne peut plus se condenser car l'air ambiant est plus chaud



la mèche se rallume franchement alors que la flamme de l'allumette est restée éloignée (1 cm), le rayonnement thermique a suffi



on éloigne l'allumette, la bougie brûle par elle-même

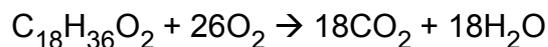
Variante de cette expérience (non reproduite ici) :

Placer l'extrémité d'un tube en verre dans la flamme d'une bougie (dans la zone sombre où, comme on l'a vu, se produit la vaporisation de la cire liquide. Une partie de la vapeur passe dans le tube. Si à l'autre extrémité on approche une allumette enflammée, la vapeur de cire qui sortira s'enflammera.

2 - Manipulation n°2 : produits de combustion d'une bougie

La vapeur de cire qui réagit avec l'oxygène (combustion) est principalement l'acide stéarique, de formule brute : $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$, de masse molaire $284 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. C'est un acide gras, obtenu comme tous les autres à partir de triglycérides extraits des plantes. Je reviendrai plus bas sur l'acide stéarique ;

L'équation de la réaction chimique de combustion est :



Comme toute combustion d'un composé organique, les produits sont du dioxyde de carbone et de l'eau (si la combustion est complète).

On peut s'en rendre compte par les manipulations simples suivantes :

- Un couvercle en verre placé au-dessus de la bougie allumée se couvre de buée sur sa face interne : signe de présence d'eau qui se condense au contact du couvercle plus froid.
- Dépôt de suie sur le couvercle, signe de présence de carbone donc de combustion incomplète.
- La vapeur issue de la combustion d'une bougie trouble l'eau de chaux.

Les manipulations suivantes que j'ai effectuées consistent à :

- Mettre en évidence la présence de vapeur d'eau dans les produits de combustion d'une bougie. Pour cela j'ai placé près de la flamme d'une bougie l'ouverture d'un ballon de verre

contenant une poudre de sulfate de cuivre anhydre adhérant à la paroi interne (le sulfate de cuivre anhydre, poudre grisâtre, est obtenue par déshydratation par chauffage de cristaux de sulfate de cuivre bleus – cf. article référence A). La poudre a viré au bleu comme indiqué sur la photo ci-après, révélant la présence d'eau dans les produits de combustion de la bougie.

- Le goulot du ballon se recouvre de suie
- Dans un deuxième temps, j'ai relié un tube à essai contenant de l'eau de chaux à un entonnoir en verre placé au-dessus de la bougie allumée. Après avoir secoué le tube, l'eau de chaux se trouble, confirmant la présence de dioxyde de carbone (voir ce phénomène dans l'article référence B).



dans le ballon poudre blanche de sulfate de cuivre anhydre



après la combustion de la bougie, dépôt de suie à l'entrée du ballon, et le sulfate de cuivre déposé sur les parois a viré au bleu : signe de présence d'eau



sulfate de cuivre anhydre avant introduction dans le ballon (blanche)



sulfate de cuivre après combustion de la bougie : il a viré au bleu, c'est du sulfate de cuivre hydraté par la vapeur d'eau



la vapeur de la bougie enflammée entre dans le tube à essai contenant de l'eau de chaux



après avoir incliné le tube à essai de façon à faire passer l'eau de chaux dans le tuyau, et l'avoir bien secoué, l'eau de chaux se trouble : elle a réagi avec le gaz carbonique présent dans le tuyau et le tube

3 - Manipulation n°3 : pour que la combustion s'entretienne

La circulation de l'air est un facteur indispensable pour entretenir une combustion. On sait en effet que la combustion d'une bougie consomme en proportion $\frac{1}{4}$ de l'oxygène de l'air, et quand il reste 15 à 20% d'oxygène O_2 dans un local la combustion cesse. Pour que la bougie puisse continuer à brûler il faut donc renouveler l'air.

Lorsqu'elle est enfermée dans un espace clos, pour maintenir sa combustion la bougie a besoin d'un courant d'air ascendant : l'air chauffé est moins dense et crée une aspiration à l'entrée inférieure du volume clos, et un refoulement à la sortie supérieure. Pour s'en convaincre, mettre une bougie dans une assiette dont le fond est recouvert de sable fin, encastrer dans le sable une bouteille en plastique dont on a retiré le fond, au-dessus de la bougie allumée. Des ouvertures auront été aménagées dans la bouteille :

- Dans un premier temps, en bas et diamétralement opposés : on constate que la bougie finit

par s'éteindre par manque de circulation d'air

- Dans un deuxième temps, en haut uniquement, et diamétralement opposés : on constate aussi une extinction progressive de la bougie
- Dans un troisième temps enfin, en bas et en haut, sur une même verticale : la combustion de la bougie est entretenue. Il existe un courant d'air ascendant que l'on peut mettre en évidence de la façon suivante : près de l'entrée inférieure, la flamme d'une bougie extérieure est aspirée vers l'intérieur de la bouteille ; près de la sortie supérieure, la flamme d'une autre bougie est refoulée vers l'extérieur.
- NB : diamètre des trous : environ 1 cm (voir photos ci-après)



lorsque les ouvertures sont situées en bas, diamétralement opposées



... la bougie finit par s'éteindre



lorsque les ouvertures sont situées en haut, diamétralement opposées



...la bougie finit par s'éteindre



lorsque les ouvertures sont situées en bas et en haut de la bouteille, sur une même verticale, l'air circule de bas en haut : une flamme près du trou inférieur est aspirée



tandis qu'une flamme placée près du trou supérieur est repoussée par l'air chaud refoulé

Alors, en présence de circulation d'air, pourquoi voit-on parfois les flammes de bougie osciller, dira-t-on ?

C'est un effet lié à la taille de la mèche et de la flamme au cours de la combustion.

Une flamme trop importante nécessite, pour être alimentée en continu, un apport également important de cire liquide montant par capillarité dans la mèche. Mais le taux de vaporisation de la cire admet une limite qui dépend de la température, de la surface de la mèche, de la quantité de cire liquide. Ce seuil ne pouvant pas être dépassé, la flamme, initialement importante, ne pourra plus maintenir son volume, lequel va diminuer. La diminution du volume de la flamme entraîne alors que la cire liquide transportée par montée capillaire est en quantité supérieure à celle qui suffirait pour maintenir la petite flamme. Il y a plus de cire liquide qu'en consomme la flamme. Celle-ci augmente alors de nouveau et le cycle recommence. D'où la succession de flammes hautes et courtes, donnant l'impression d'oscillations. A noter que ces oscillations sont plus rapides pour une mèche courte : la montée capillaire se faisant sur une distance plus courte, l'apport de cire liquide à la flamme se fait plus rapidement. C'est la raison pour laquelle les oscillations de flamme de bougie apparaissent à la fin : la mèche est plus petite à la fin.

4 - Manipulation n°4 : chaleur de combustion d'une bougie

La combustion d'une bougie, comme celle de tout combustible fossile, du bois et de certains composés organiques, est source d'énergie. Cela signifie que la rupture des liaisons chimiques des molécules sous l'effet de chaleur est elle-même productrice d'énergie thermique, en quantité plus importante que l'énergie apportée. On dit que la combustion de la bougie est exothermique, plus précisément, son enthalpie de combustion est négative (elle est cédée).

En thermodynamique, il est d'usage de caractériser cette chaleur de combustion par l'enthalpie molaire ou l'enthalpie massique, puisqu'elle est proportionnelle à la masse ou au nombre de moles consommés dans la réaction.

Pour évaluer quantitativement cette chaleur de combustion de la cire, voici une expérience assez simple.

Son principe est le suivant : la quantité de cire Δm qui a été consommée lors de la combustion a permis un apport de chaleur (enthalpie) ΔH d'une quantité connue d'eau contenue dans un récipient bon conducteur thermique, qui leur a fait augmenter la température d'une quantité ΔT . Or la variation d'enthalpie est proportionnelle à celle de la température via les masses et capacités calorifiques connues des matériaux mis en jeu. Par application du premier principe de

la thermodynamique, si l'on suppose le système isolé et n'échangeant pas de chaleur avec l'extérieur, on en déduit l'enthalpie de combustion de la bougie. L'enthalpie molaire est obtenue par le nombre de mole concerné, donc nécessite de connaître la formule de la molécule du combustible (l'acide stéarique).

Mise en œuvre (voir photo) :

- Choisir une boîte métallique, bon conducteur de la chaleur. Une boîte de conserve en aluminium fera l'affaire, sa capacité calorifique est $c' = 0,897 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} \text{g}^{-1}$. Mesurer sa masse : on obtient ici $m' = 50\text{g}$.
- Verser dans cette boîte 200 ml d'eau (masse $m'' = 200 \text{ g}$) de capacité calorifique $c'' = 4,18 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} \text{g}^{-1}$.
- Repérer la température initiale de l'eau : on obtient ici $T = 10^\circ\text{C}$.
- Poser la boîte contenant l'eau sur un socle peu conducteur de la chaleur (carreaux en terre cuite empilés) de manière à laisser au-dessous d'elle un emplacement pour la bougie.
- Peser une bougie : on trouve ici $m^\circ = 53\text{g}$.
- Fixer la bougie au-dessous de la boîte, et l'allumer : attention, la flamme doit être bien au contact du fond de la boîte, et veiller à ce qu'elle ne s'éteigne pas.
- Éteindre la bougie lorsque la température finale de l'eau est $T' = 40^\circ\text{C}$. Il ne faut pas aller au-delà car, par suite d'une trop grande différence de température entre l'eau et l'air ambiant, il y aurait des pertes thermiques importantes qui fausseraient les résultats.
- Retirer la bougie délicatement, sans perdre de la cire liquide, et la peser de nouveau. La nouvelle masse après combustion est $m = 52\text{g}$, soit une différence $\Delta m = 1 \text{ g}$ de cire transformée pendant la combustion.



Dispositif pour évaluer la chaleur de combustion de la bougie

Soit ΔH la variation d'enthalpie de l'ensemble boîte + eau et $\Delta H'$ celle de la vapeur de cire (acide stéarique) au cours de la combustion. Le système étant supposé isolé (pas d'échange de matière ou d'énergie avec l'extérieur) sa variation totale d'enthalpie est nulle, on a donc :

$$\Delta H + \Delta H' = 0$$

on connaîtra alors $\Delta H'$ si l'on connaît ΔH .

Or on a :

$$\Delta H = m' c' \Delta T + m'' c'' \Delta T$$

avec : $\Delta T = T' - T$

numériquement :

$$\Delta H = (50 \times 0,897 + 200 \times 4,18) \times (40 - 10) = 26426 \text{ J}$$

on en déduit l'enthalpie de combustion des 1 g d'acide stéarique : $\Delta H' = -26426 \text{ J}$, la réaction

est bien exothermique. L'enthalpie massique est obtenue par : $\Delta H'/\Delta m = -26426 \text{ J/g}$. Pour calculer l'enthalpie molaire, on a besoin de connaître le nombre de moles correspondant à la masse d'acide stéarique consommée lors de la combustion, soit : $n = \Delta m/M$ où M est la masse molaire de l'acide stéarique : $M = 284 \text{ g.mol}^{-1}$. On obtient $n = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ mole}$. D'où l'enthalpie molaire $H_m = \Delta H'/n = -6,77 \text{ MJ.mol}^{-1}$.

Cette valeur de l'enthalpie molaire de combustion de l'acide stéarique obtenue par notre manipulation est sous-évaluée par rapport à celle donnée par les tables de thermodynamique : $H_m = -11,281 \text{ MJ/mol}$. Cela tient à plusieurs facteurs :

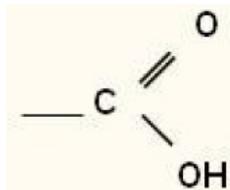
- La chaleur dégagée par la combustion de la cire n'a pas été intégralement transmise à l'eau : une partie s'est dissipée dans l'atmosphère.
 - La boîte n'étant pas calorifugée, elle a transmis une partie de la chaleur reçue à l'atmosphère plus froid.
 - La précision de la mesure des masses est discutable. Celle de la température aussi.
- Pour obtenir des résultats plus précis il aurait fallu réaliser la combustion dans un calorimètre.

5 - Quelques mots sur la stéarine et les bougies

Une bougie est faite à partir d'un mélange de cire de paraffine et d'une faible proportion d'acides gras dont le point de fusion est élevé : la stéarine ou acide stéarique.

La stéarine est préparée à partir des huiles grasses, généralement des suifs ou des huiles de palme. On peut aussi l'obtenir par hydrolyse d'autres huiles grasses : huiles hydrogénées comme celle de l'huile de lin, de soja ou de tournesol, etc, mais dans ce cas la texture de la stéarine obtenue est moins bonne.

L'acide stéarique fait partie de la famille des acides carboxyliques, qui sont des hydrocarbures linéaires ou cycliques avec un groupement :

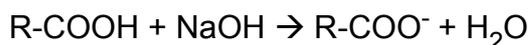


(radical alcane R avec une fonction acide R-COOH). Les acides carboxyliques forment facilement des dimères (association de deux molécules identiques) grâce aux liaisons hydrogène (référence C) qu'ils présentent entre les molécules. Par conséquent, pour obtenir une transition de l'état liquide à l'état gazeux des acides carboxyliques il faut d'abord « casser » les liaisons hydrogènes dans les dimères : il s'ensuit que la température d'ébullition des acides carboxyliques est plus élevée que pour leurs alcanes correspondants.

Seuls les acides carboxyliques ayant moins de 4 atomes de carbone sont solubles dans l'eau (exemples : acide formique HCOOH, acide acétique CH₃COOH, acide propionique CH₃CH₂COOH). L'acide stéarique qui comporte 18 C n'est évidemment pas soluble.

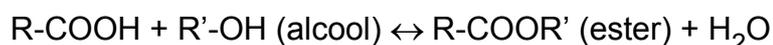
Les acides carboxyliques sont des acides faibles : leur pK_A s'échelonne de 3 à 5 (cf. référence D pour cette notion).

Ils réagissent avec une base pour donner la base conjuguée de l'acide, ainsi avec la soude la réaction donne :



La réduction d'un acide carboxylique donne un alcool R-CH₂OH.

L'estérification des acides carboxyliques donne des esters :



(la réaction inverse est l'hydrolyse).

Les acides carboxyliques sont présents à l'état naturel dans les cellules et les membranes des plantes ou dans les fruits, soit directement comme acides gras soit sous forme dérivée d'esters. Au-delà de 12 C dans la molécule, les acides carboxyliques sont obtenus à partir des graisses et des huiles (esters d'acides gras et esters de glycérol).

Bibliographie

- Réf. A : [eau céleste et oxydoréduction](#) – F. Élie, novembre 2004
- Réf. B : [eau de chaux et chimie du calcium](#) – F. Élie, 25 février 2004
- Réf. C : [liaison hydrogène et autres liaisons chimiques](#) – F. Élie, août 2004
- Réf. D : [acides et indicateurs colorés](#) – F. Élie, 27 février 2004