

# LES FEUX DANS TOUTES LEURS COULEURS

Reinhard NEIER

## Introduction visuelle



*Le 1er Août: Compétition entre les feux*



# L'INCENDIE PRÈS DE VIÈGE

*Le 26 avril 2011 une énorme incendie détruit  
100 hectares de forêt de protection*



# LE FEU: UNE CATASTROPHE

*L'incendie dans le tunnel du Gotthard  
le 24 octobre 2001: 11 morts*



*Le 6 août 2000, près du Bitterroot River au milieu du  
Sula Fire Complex (Montana)*



Photo de John McColgan

*Un feu du 1<sup>er</sup> août: Couleurs jaunes chaleureuses*



## *Les couleurs des bougies sur une couronne d'avents*



## *Les couleurs froides des flammes de gaz naturel*

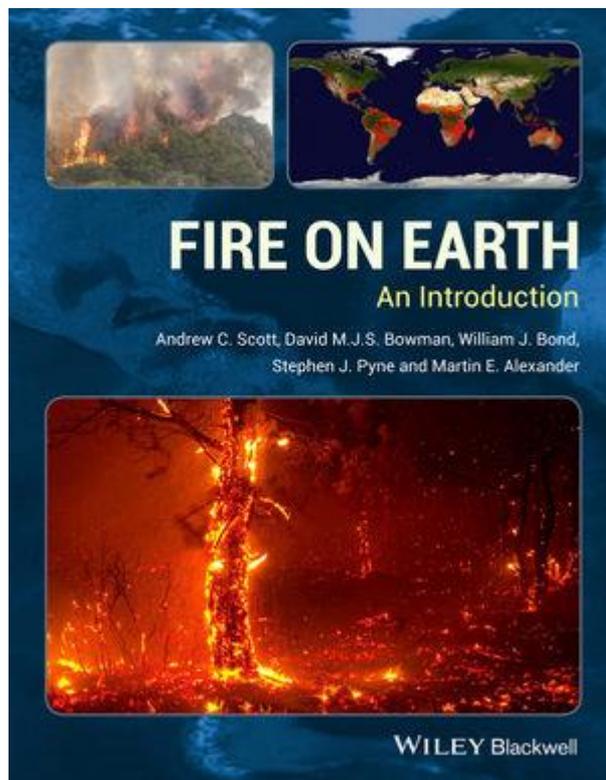


*Les étincelles créées par une flamme d'acétylène*



- Les feux sont une expression de la présence de la vie sur terre
- Les traces laissées par les feux sont un enregistrement de l'histoire de la vie
- Les processus impliqués dans des feux sont entiers, unique et anciens
- **Une histoire scientifique des feux et  
Les feux dans l'histoire des sciences**

- L' *histoire géologique* des feux
- L'influence *humaine* sur les «*feux*» sur terre
- La philosophie naturelle: la théorie des *quatre éléments*  
la terre (▽) ; l'eau (▽) ; l'air (△) ; le feu (△)
- La science et la *compréhension des processus liés aux feux*
- Les couleurs en *absorbance* et en *émission*
- (*Les feux d'artifice: une histoire résumée*)
- Les feux d'artifice: quelques *notions du fonctionnement*

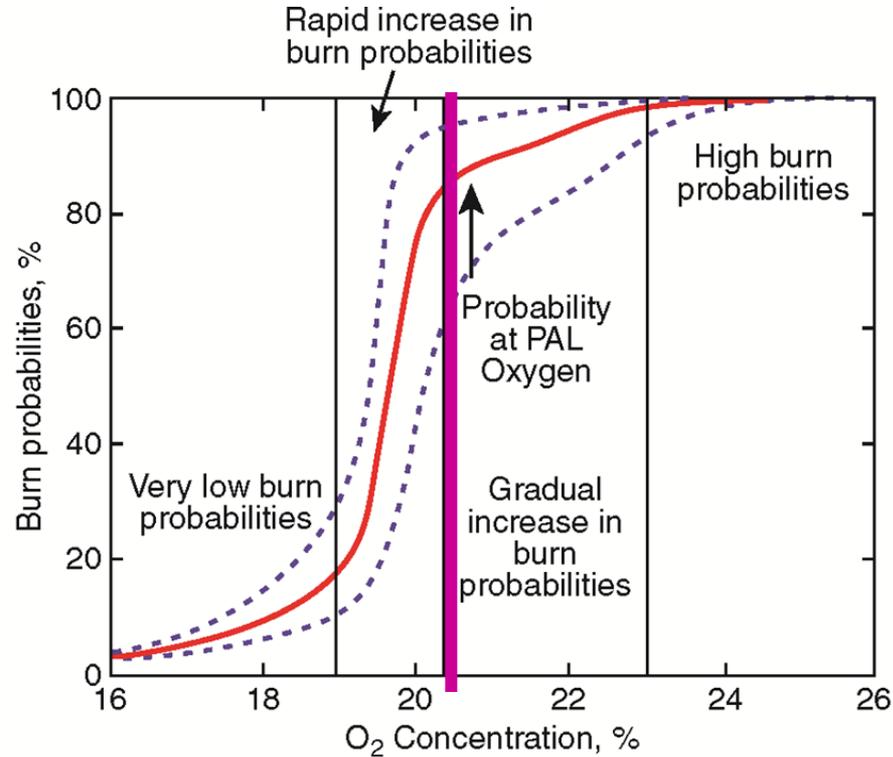


- ✓ Andrew C. Scott            Paleobotany, Wildfire history
- ✓ David M. J. S. Bowman    Human-Environment systems
- ✓ William J. Bond            Fire Ecology
- ✓ Stephen J. Pyne            History (of fire)
- ✓ Martin E. Alexander        Forestry + Fire protection

**La Terre est la seule planète connue hébergeant le feu.** La raison est à la fois simple et profonde: **le feu existe parce que la Terre est la seule planète à posséder la vie comme nous la connaissons.**

➤ ***(Avec une atmosphère riche en oxygène!)***

Probabilité  
des incendies



Situation  
actuelle

Concentration  
d'oxygène

Les «variables» sont relié par:

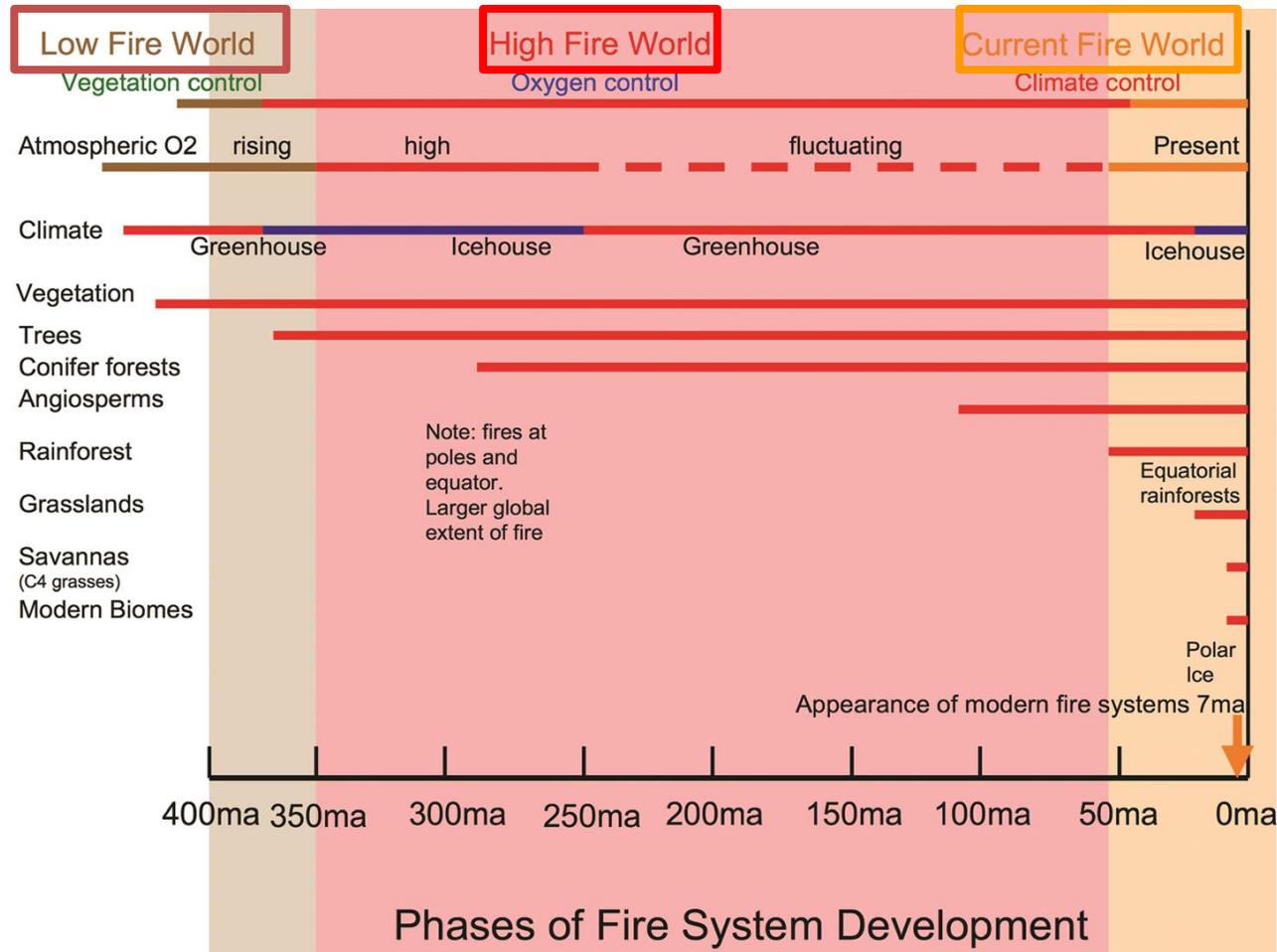
- La photosynthèse
- La respiration

Trois variables:

- Le climat = la température (influencée par les gaz à effet de serre p.ex. CO<sub>2</sub>)
- La végétation = la quantité du combustible
- La concentration d'O<sub>2</sub> = la quantité du comburant

d

# LES FEUX DANS LA PRÉHISTOIRE



Trois phases (au moins) AVANT l'apparition de l'homme:

✓ **peu de feux**

✓ **beaucoup de feux**

✓ **régime actuel**

peu de O<sub>2</sub>; contrôlé par la végétation; température monte  
beaucoup de O<sub>2</sub>; contrôlé par O<sub>2</sub>; température variable  
O<sub>2</sub> actuel; contrôlé par le climat; température stable?



Les réserves de charbon  
sont les restes  
d'énormes feux dans le passé

**Figure 4.9** Charcoal in Permian coal (Photos A. C. Scott).

A. Thick Permian coal seam, Kusnetsk Basin, Siberia, Russia that contains abundant charcoal.

B

*Fire on Earth: An Introduction*, First Edition. Andrew C. Scott, David M.J.S. Bowman, William J. Bond, Stephen J. Pyne and Martin E. Alexander.

© 2014 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.



Constantin Hansen, 1845 (National Gallery)



Jan Cossier, 1630 (Prado)

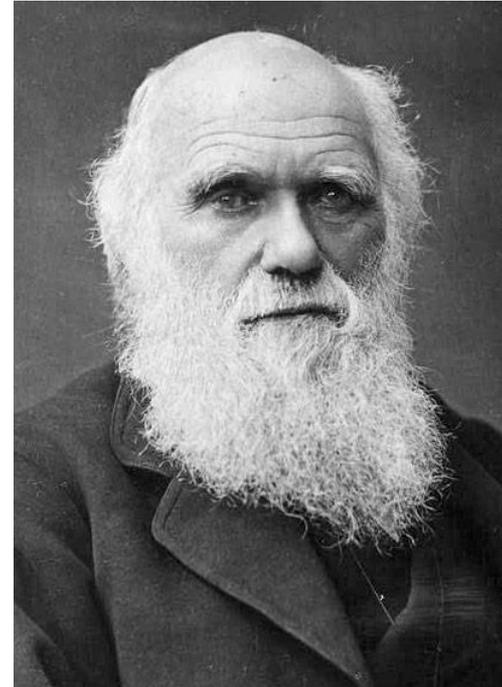
- Prométhée créant l'homme à partir de la glaise
- Prométhée apportant le feu



- Prométhée créant l'homme à partir de la glaise
- Prométhée apportant le feu

# LE FEU EST UN PROCESSUS CRUCIAL POUR LES HUMAINS

*Commentaire “spontané” de Charles Darwin*



From: Descent of man (1871)

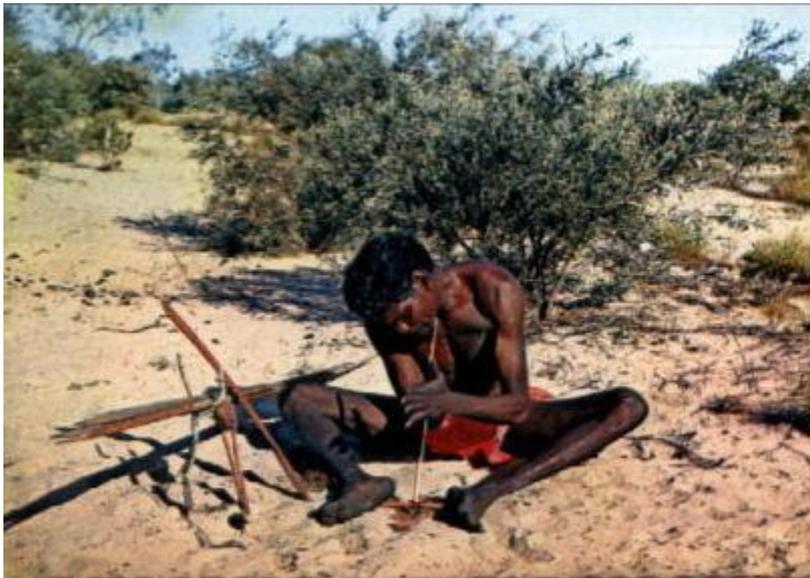
Chapter II: On the Manner of Development of Man from some Lower Form

*“This discovery of fire, probably the greatest ever made by man, excepting language, dates from before the dawn of history.”*

# LE FEU EST UN PROCESSUS CRUCIAL POUR LES HUMAINS

- ✓ Quelle était la motivation d'écrire ce commentaire?
- ✓ Comment interpréter cette phrase?

“He has discovered *the art of making fire*, by which *hard and stringy roots* can be *rendered digestible*, and *poisonous roots* or herbs *innocuous*.”



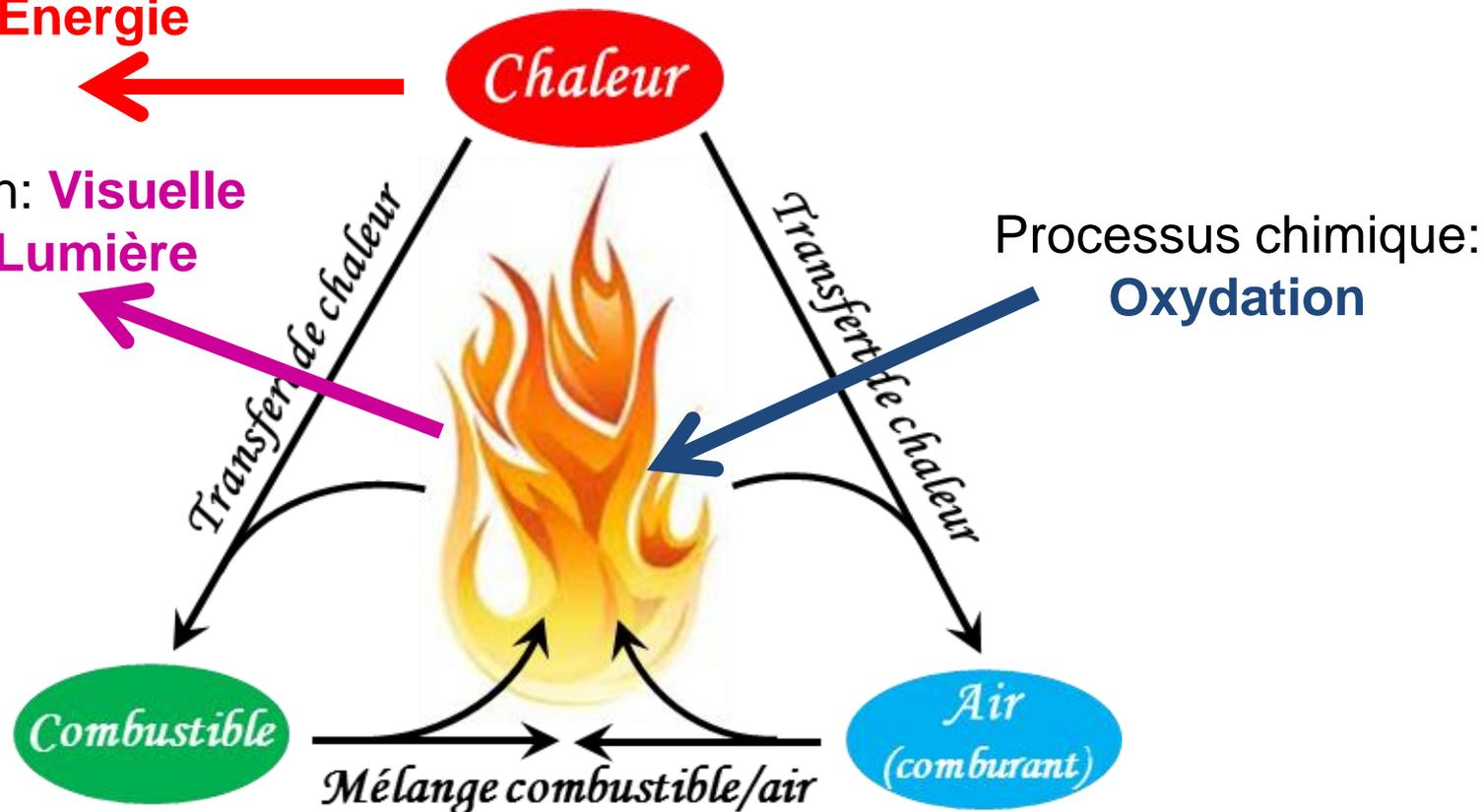
## Le "triangle" du feu

➤ Observation: **Chaleur**

➤ Utilisation: **Énergie**

➤ Observation: **Visuelle**

➤ Utilisation: **Lumière**



Aujourd'hui on utilise des modèles informatiques sophistiqués:

*Approche du détective (=cinétique) - Approche comptable (=thermodynamique)*

*Tous les feux sont des processus d'**oxydation***

Définition suivant Lavoisier: (*nomenclature moderne*)

**Oxydation** = «combinaison avec l'oxygène»

✓ Plus précis: combinaison d'un élément avec l'oxygène

**Réduction** = «élimination de l'oxygène»

✓ Nomenclature de Lavoisier: **calcination**



**A.-L. Lavoisier**  
(1743 -1794)

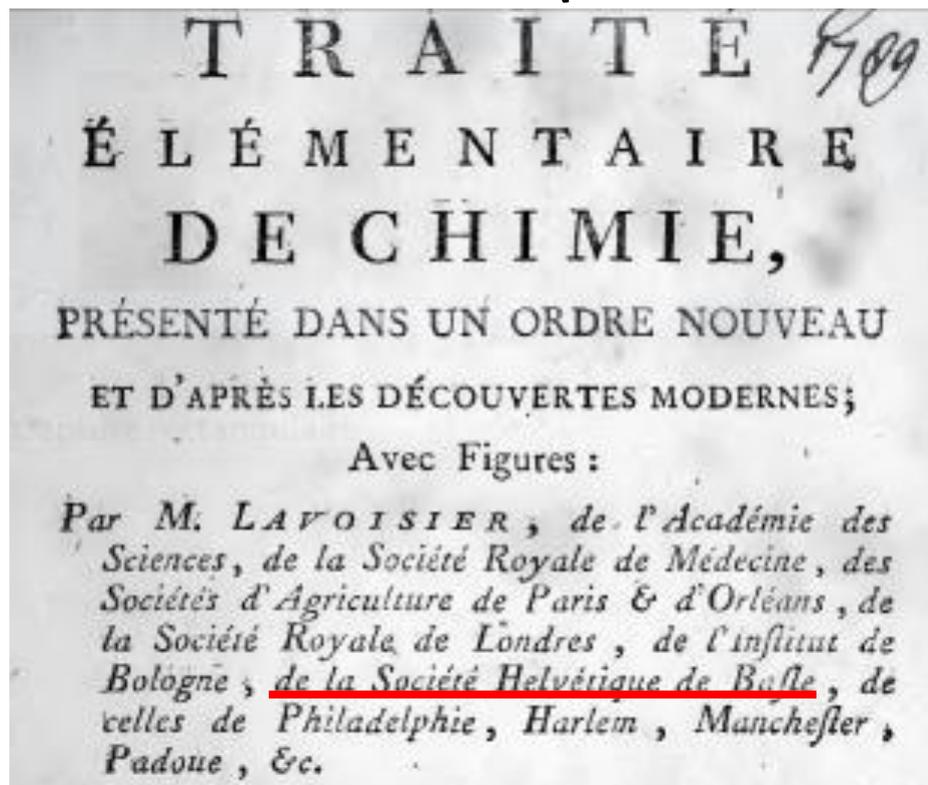
*M É M O I R E*  
*SUR LA COMBUSTION EN GÉNÉRAL.*

Par M. L A V O I S I E R.

5 Septembre

1777.

Tous les feux sont des processus d'**oxydation**



A PARIS,  
Chez CUCHET, Libraire, rue & hôtel Serpente.

**1789 (=début de la Révolution!)**

*Tous les feux sont des processus d'oxydation*

Antoine-Laurent de Lavoisier comme «*fermier général*» est condamné par le Tribunal révolutionnaire le 8.5.1794 et guillotiné le même jour.

**“*La République n'a pas besoin de savants et de chimistes. Le cours de la justice ne peut être suspendu*”**

- attribué à Jean-Baptiste Coffinhal ( né le 7.11.1762 guillotiné le 6.8.1794
- cité par Nicolas-Toussaint Lemoyne des Essarts dans *Les Siècles littéraires de la France*, Paris 1800-1803
- Discussion controversée par James Guillaume (socialiste libertaire)

**«*Il ne leur a fallu qu'un moment pour faire tomber cette tête et cent années peut-être ne suffiront pas pour en reproduire une semblable.*»**

Joseph Louis Lagrange

*Tous les feux sont des processus d'**oxydation***

de ses ouvrages. Il y établit que nous ne pensons qu'avec le secours des mots; que les langues sont de véritables méthodes analytiques; que l'algèbre la plus simple, la plus exacte & la mieux adaptée à son objet de toutes les manières de s'énoncer, analytique; enfin que l'art de raisonner se réduit à une langue bien faite. Et en

A P A R I S,  
Chez CUCHET, Libraire, rue & hôtel Serpente.  
M. D C C. L X X I X.

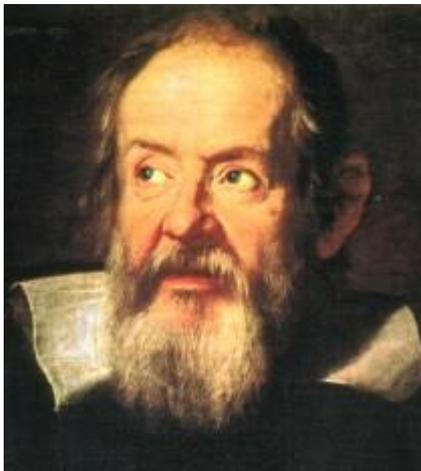
*L'approche choisie par Lavoisier:*

**A**UTANT l'esprit de système est dangereux dans les Sciences physiques, autant il est à craindre qu'en entassant sans ordre une trop grande multiplicité d'expériences, on n'obscurcisse la Science au lieu de l'éclaircir ;

1. Éviter les préjugés (=systèmes)
2. Se baser sur les expériences - **Galileo**
3. Partir d'hypothèses pour interpréter et réfuter les résultats - **Popper**
4. Éviter d'entasser des observations sans motifs - **Poincaré**

*L'approche choisie par Lavoisier:*

1. Éviter les préjugés (=systèmes)
2. Se baser sur les expériences - **Galileo**
3. Partir d'hypothèses pour interpréter et réfuter les résultats - **Popper**
4. Éviter d'entasser des observations sans motifs - **Poincaré**



*«Sì perché l'autorità dell'opinione di mille nelle scienze non val per una scintilla di ragione di un solo»*



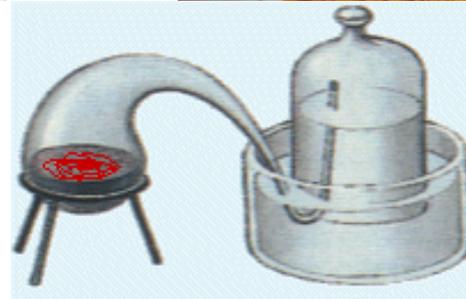
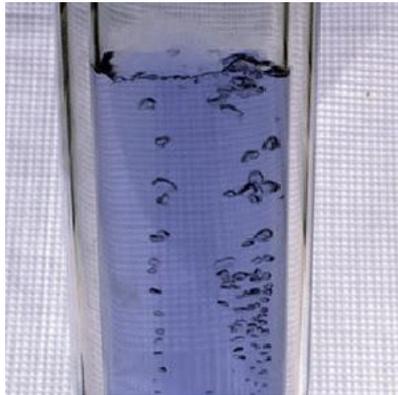
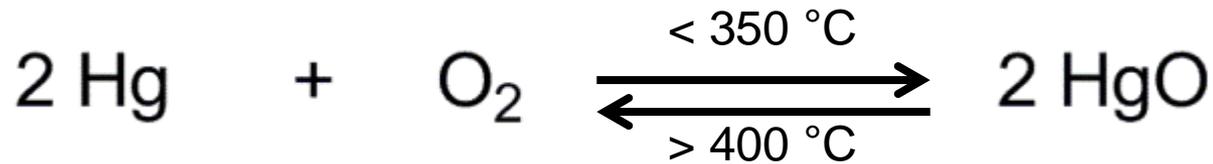
- *« No matter how many instances of white swans we may have observed, this does not justify the conclusion that all swans are white. »*
- *« Those among us who are unwilling to expose their ideas to the hazard of refutation do not take part in the scientific game. »*



*« Le savant doit ordonner ; on fait la science avec des faits comme une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. »*

*L'approche expérimental choisi par Lavoisier:*

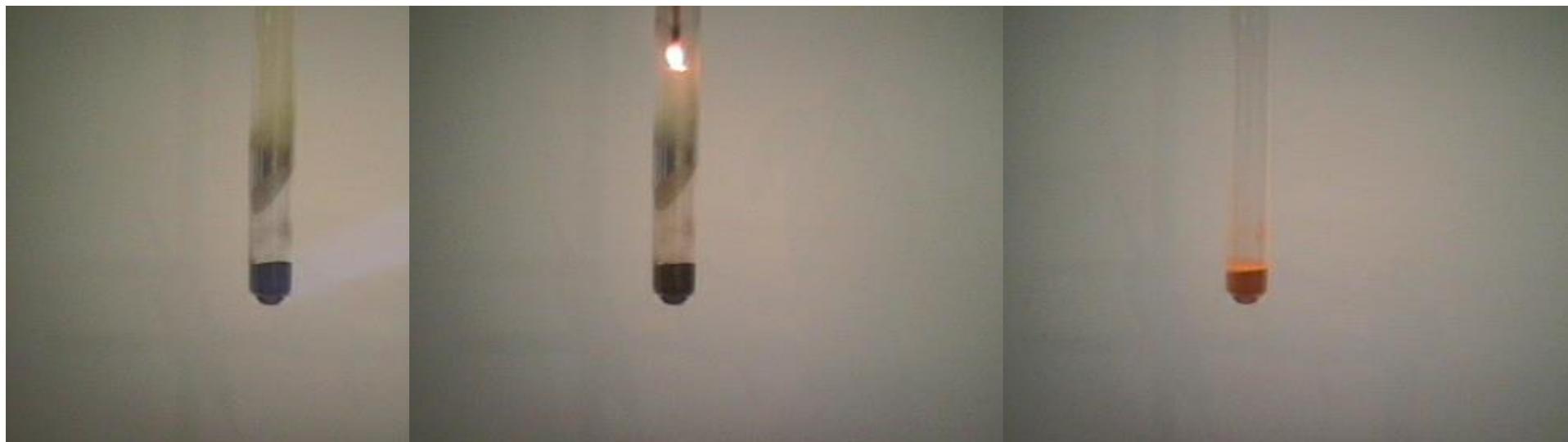
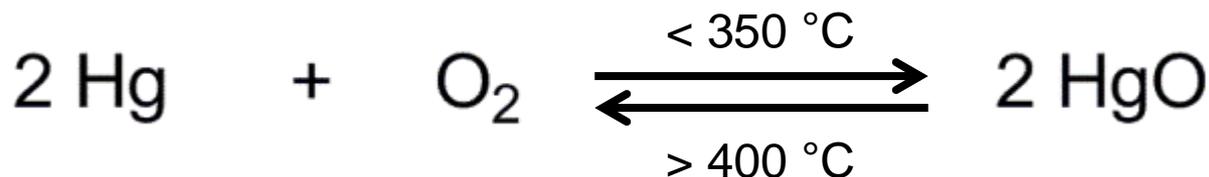
Transformation suivante:



Réaction est **réversible** et le changement des couleurs **évident**

*L'approche expérimental choisi par Lavoisier:*

Transformation suivante: **Version moderne**



Preuve de la présence de  $\text{O}_2$

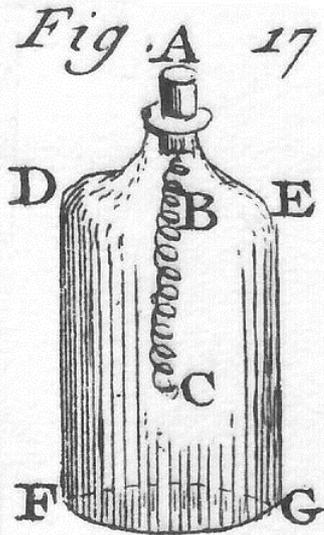
Chauffer à  $> 400^\circ\text{C}$

L'éprouvette avec l'oxyde de mercure (II)

**Présence de l'élément (Hg) et son oxyde (HgO)**

*L'approche expérimental choisi par Lavoisier:*

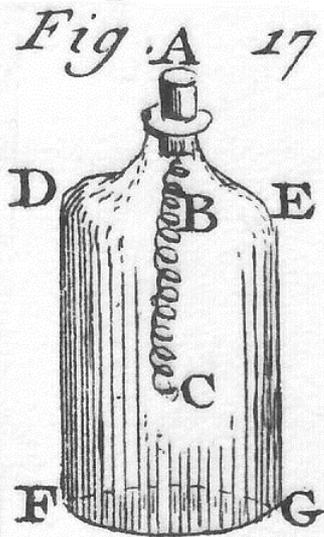
Tout le monde connoît aujourd'hui la belle expérience de M. Ingenhouz sur la combustion du fer. On prend un bout de fil de fer très-fin



Jan Ingenhousz  
(1730 – 1799)  
photosynthèse et variolisation

*L'approche expérimental choisi par Lavoisier:*

doue, & celle-ci la communique au fer. Quand les copeaux ont été bien arrangés, tout le fer brûle jusqu'au dernier atôme, en répandant une lumière blanche, brillante, & semblable à celle qu'on observe dans les étoiles d'artifice Chinois. La grande chaleur qui s'opère pendant



# LA MATIÈRE ORGANIQUE COMME COMBUSTIBLE POUR ALLUMER UN FEU

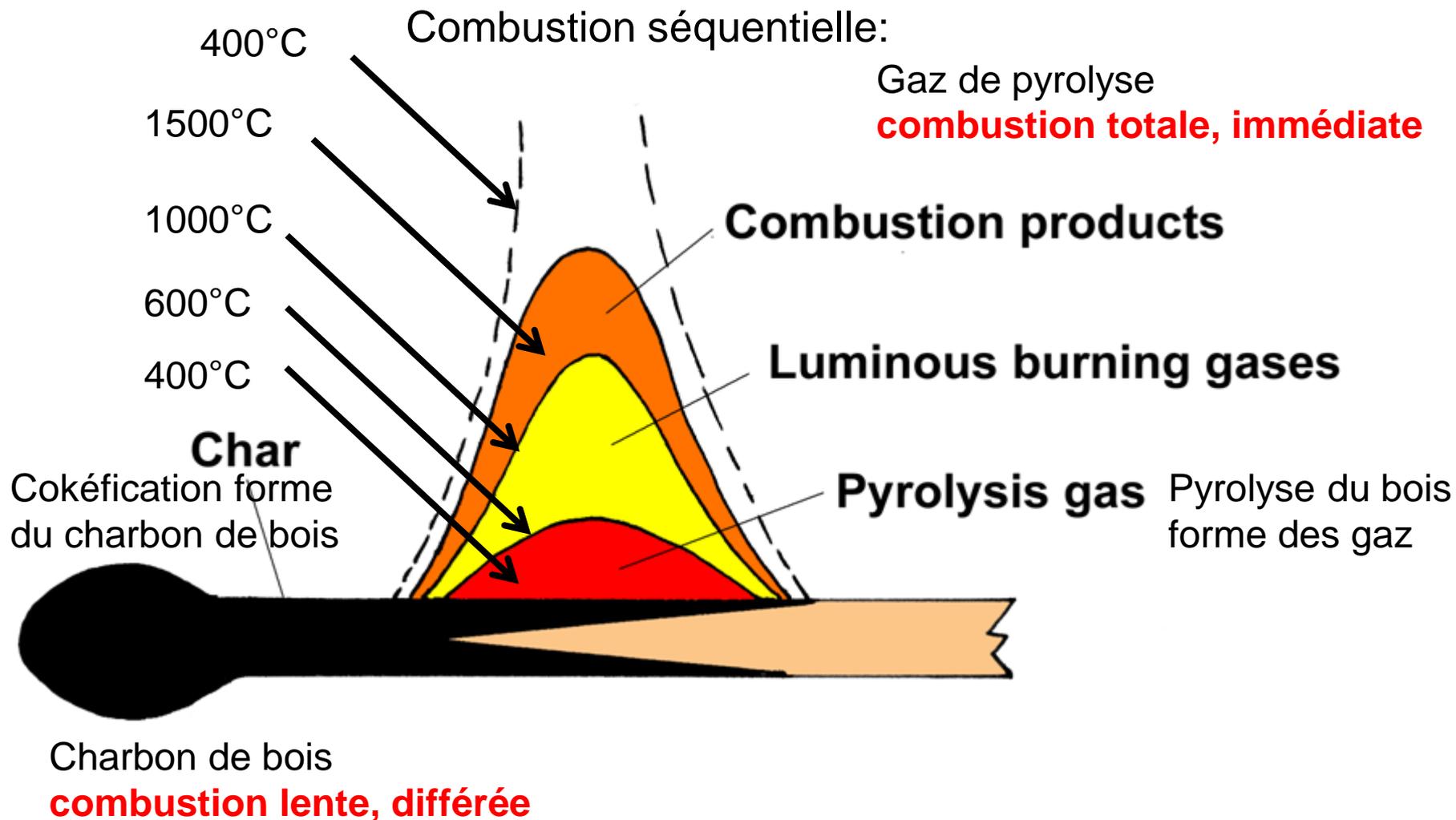
*Pour allumer un feu il faut:*

- ✓ Présence de combustibles: typiquement des matières organiques, p.ex. du bois  
**Matières minérales brûlent moins facilement**
- ✓ Présence du comburant (oxydant): typiquement de l'oxygène ( $O_2$ )
- ✓ Température d'auto inflammation du papier:  $> 471$  ° Fahrenheit (=  $233$  °C)
- ✓ Température d'inflammation du bois  $300$  °C (=apparition des flammes)

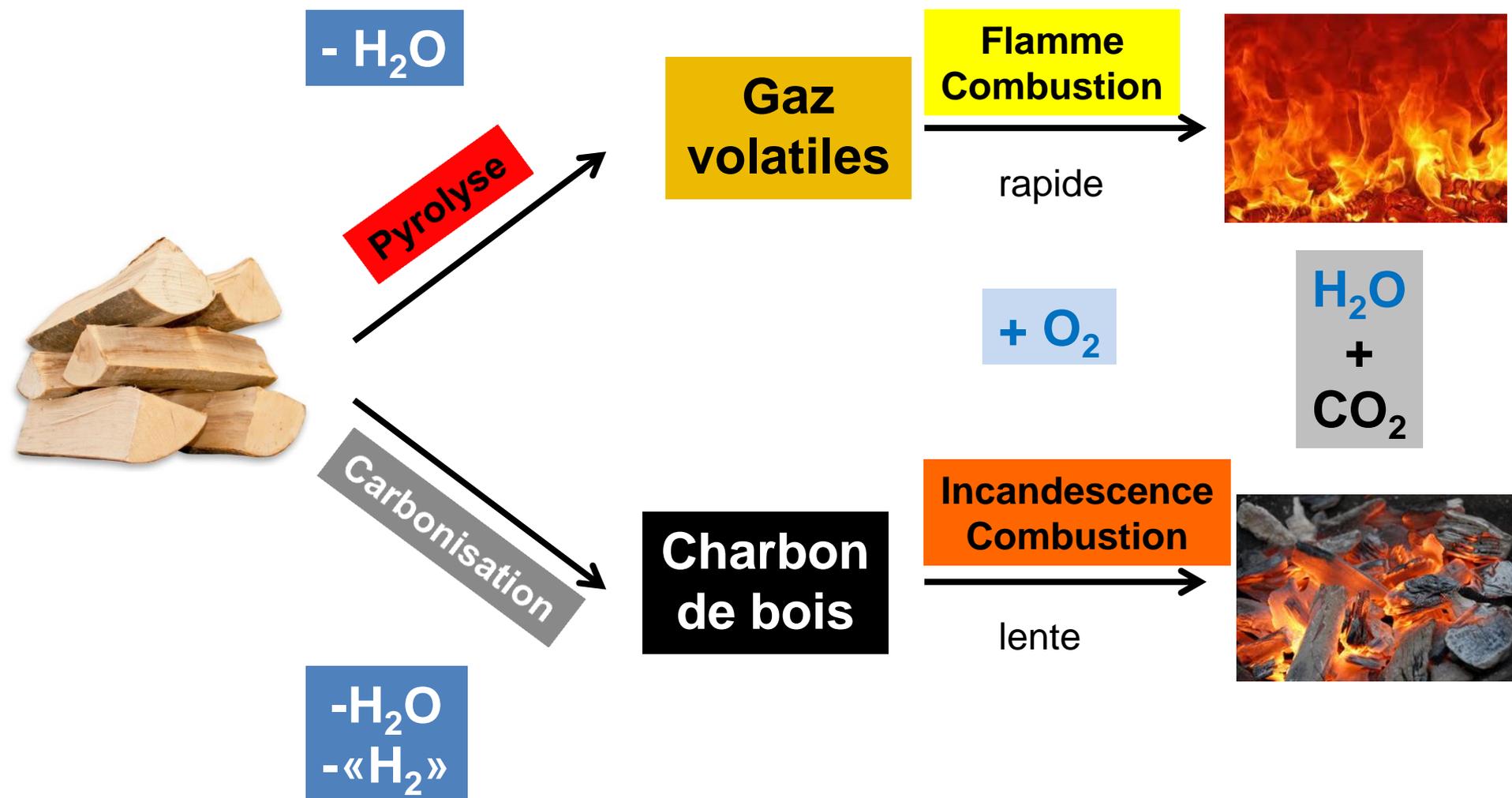


# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?

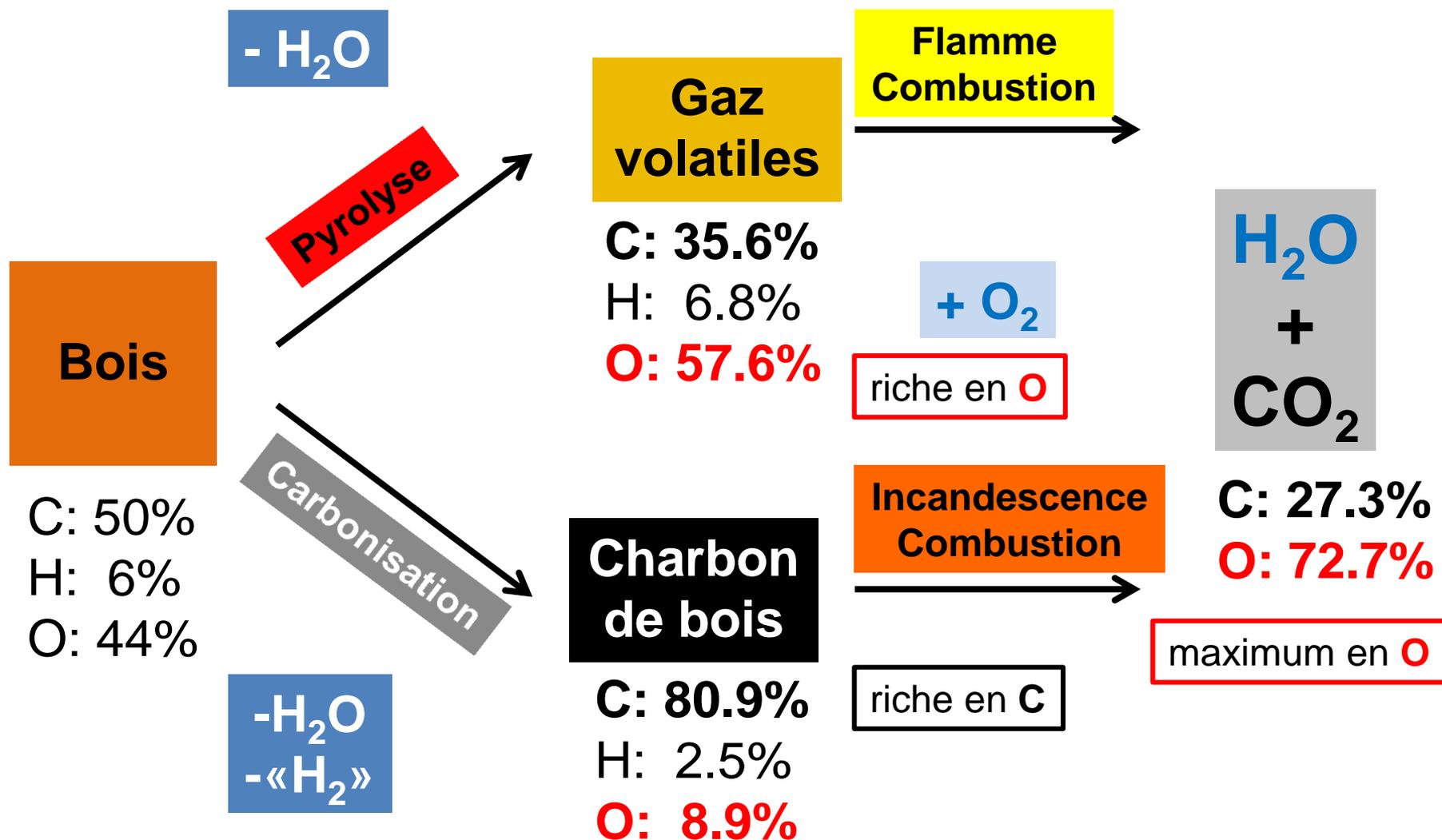
Deux procès ont lieu en parallèle sous l'influence de la chaleur:



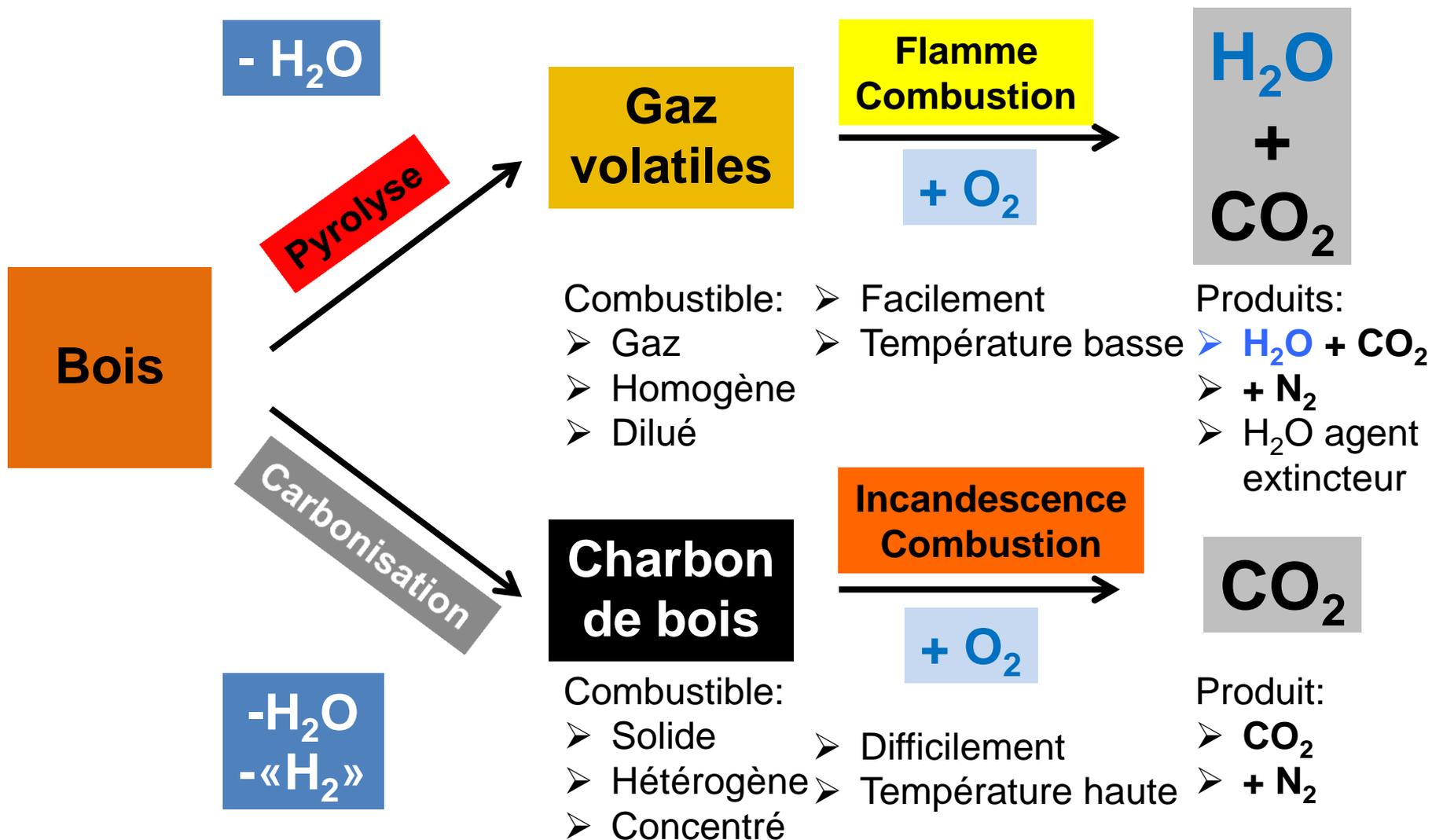
# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?



# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?



# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?



# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?

**Gaz  
volatiles**

**Flamme  
Combustion**



$$\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) = 57.9 \text{ kcal/mole} \\ = 241.9 \text{ kJ/mole}$$

**Charbon  
de bois**

**Incandescence  
Combustion**



$$\Delta H_f(\text{CO}_2) = 94.2 \text{ kcal/mole} \\ = 393.6 \text{ kJ/mole}$$

Température de la flamme calculée  
(température *adiabatique*):

- CH<sub>4</sub> 2212 °C
- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 2247 °C
- C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 2358 °C
- C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 2531 °C



➤ **Conséquence:**

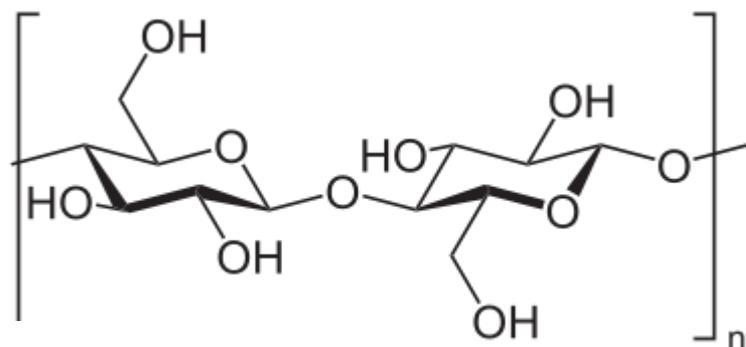
Rapport C/H augmente  
Température augmente

- H<sub>2</sub> 2367 °C
- C 3795 °C !

➤ **Explications:**

- CO<sub>2</sub> forme plus d'énergie
- H<sub>2</sub>O consomme plus d'énergie pour se chauffer
- H<sub>2</sub>O plus fragile

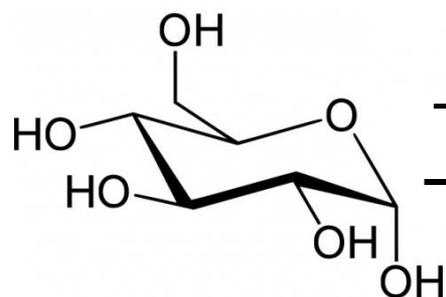
# POURQUOI LA MATIÈRE ORGANIQUE EST LE COMBUSTIBLE PRIVILÉGIÉ?



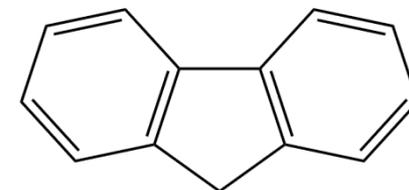
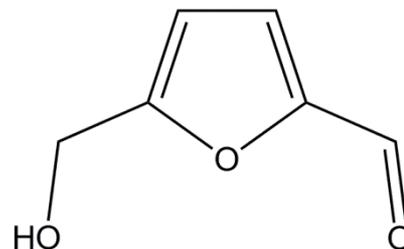
**Gaz  
volatiles**

**Charbon  
de bois**

- 3 x H<sub>2</sub>O  
- 2 x CO  
- 2 x CH<sub>2</sub>O  
- 1 x CO<sub>2</sub>



- 3 x H<sub>2</sub>O



C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>

C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>

C<sub>13</sub>H<sub>10</sub>



enlever O  
(= - H<sub>2</sub>O)



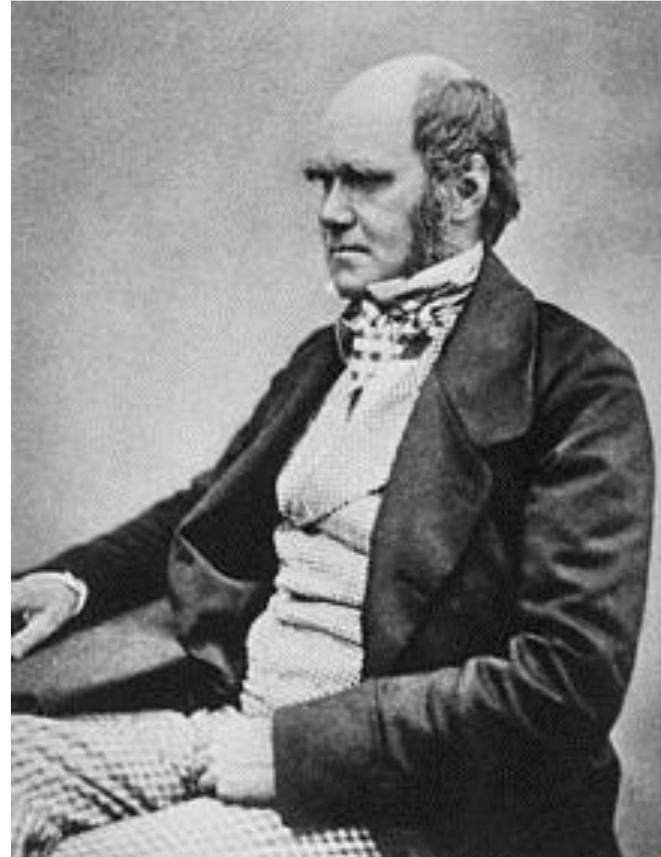
augmenter  
rapport C/H

# 1859 L'ANNÉE DES RÉVOLUTIONS (SCIENTIFIQUES) GUSTAV KIRCHHOFF + ROBERT BUNSEN ET CHARLES DARWIN



G. Kirchhoff      R. Bunsen  
(1824 - 1887)    (1811 - 1899)

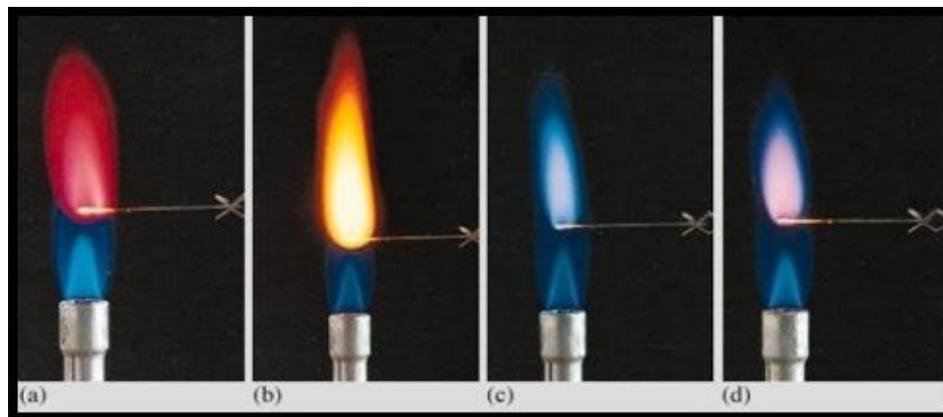
**Invention de la spectroscopie**



Ch. Darwin  
(1809 - 1882)

**On the Origin of Species**

# PHYSICIEN + CHIMISTE GUSTAV KIRCHHOFF + ROBERT BUNSEN



Sr

Cs Na

Pb

KRb



Gustav Kirchhoff (1824 – 1887)

- Prof. à Heidelberg (1854!) et puis à la Humboldt Universität (1875)
- Lois de Kirchhoff: circuit électrique (1845)
- Relation de Kirchhoff: thermochimie (1858)
- Découvre la spectroscopie (1859)
- Les trois lois de la spectroscopie (1859)
- La radiation du corps noir (1862)
- Identifie le Césium et le Rubidium (1861)
- Interprétation du spectre du soleil

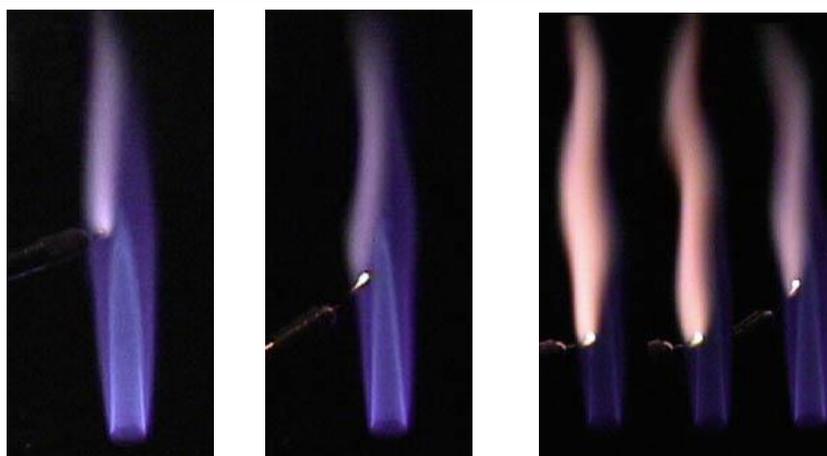
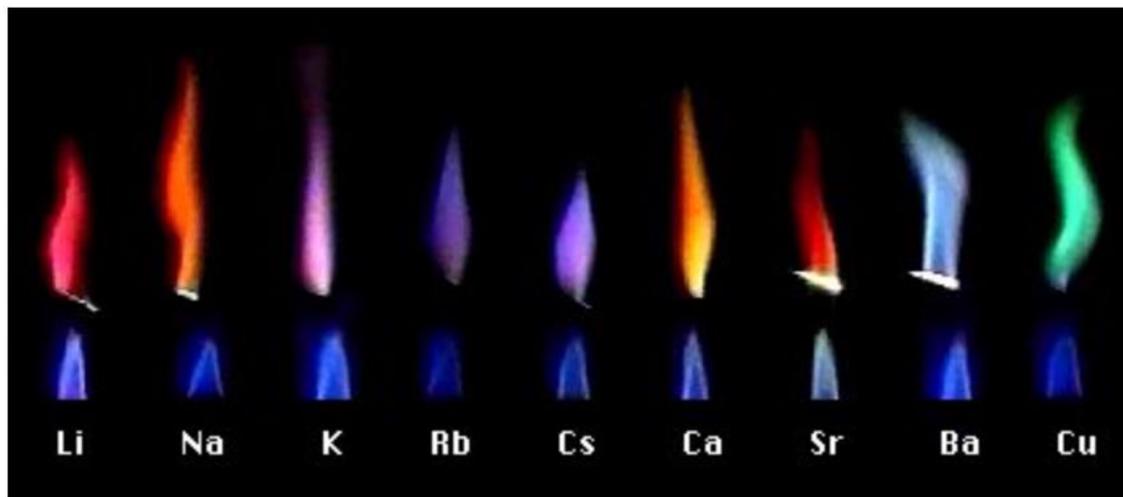
Robert Wilhelm Bunsen (1811 – 1899)

- Prof. à Marburg, Breslau et Heidelberg
- Soutien de la nomination de Kirchhoff
- Modèle du fonctionnement des geysers
- Amélioration des hauts-fourneaux
- Développe la pile Bunsen (Leclanché)
- Propose un calorimètre à glace
- Invente le «bec Bunsen» (1857)
- Co-découvre la spectroscopie (1859)
- Isole le Césium et le Rubidium (1861)

# LA COLLABORATION ENTRE UN APPROCHE «EMPIRIQUE» ET UN «COLLECTEUR DE DONNÉS»

Étroite collaboration entre Bunsen et Kirchhoff:

- Bunsen est conscient de l'irrégularité du test à la flamme



Séquence pour K

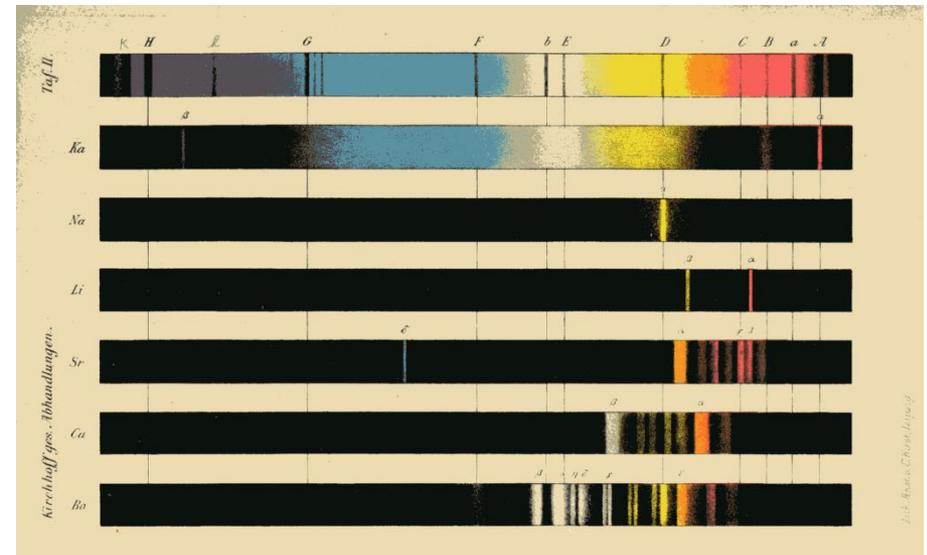
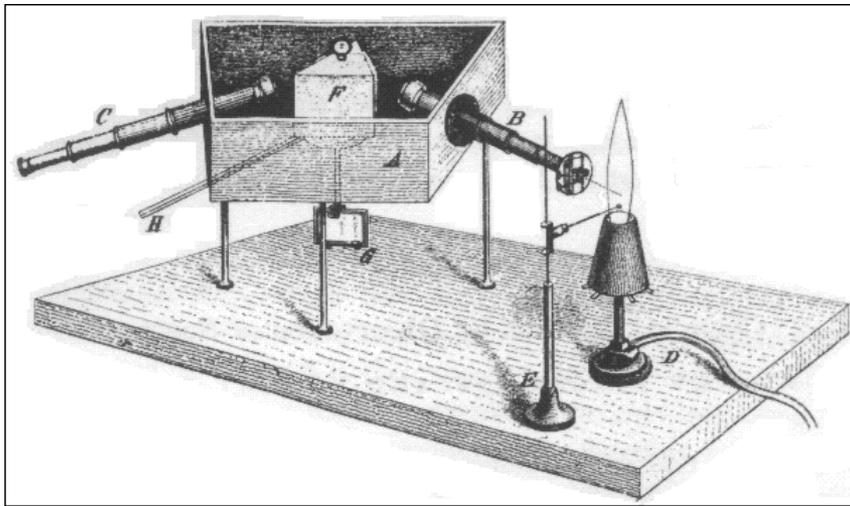
- Températures différentes
- Intensités différentes
- Couleurs différentes
- Contamination?

<http://www.chemicum.com/?video=53&lan=EN>

# LA COLLABORATION ENTRE UN APPROCHE «EMPIRIQUE» ET UN «COLLECTEUR DE DONNÉS»

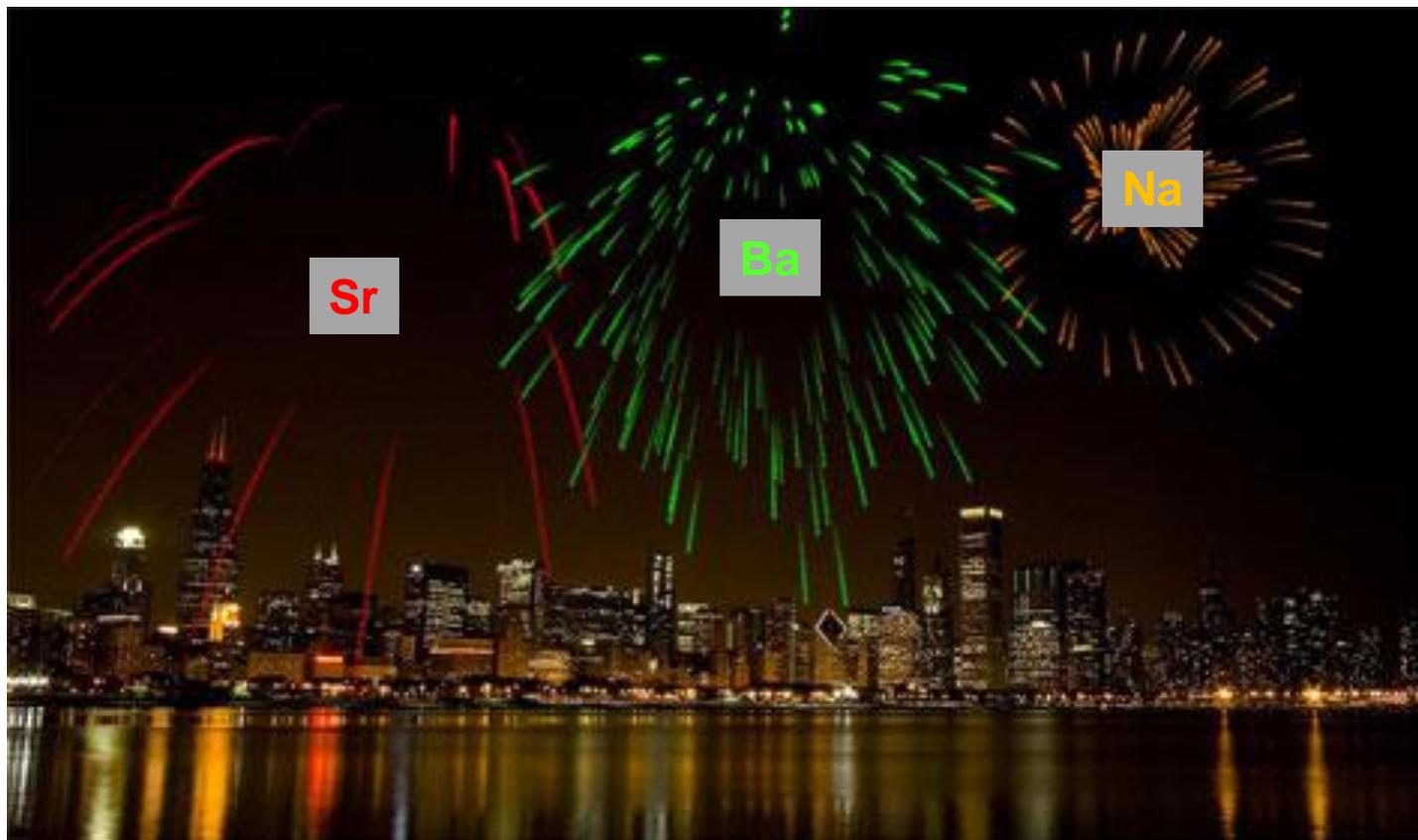
Étroite collaboration entre Bunsen et Kirchhoff:

- Bunsen connaît la méthode: Test à la flamme
- Bunsen développe une source reproductible de flammes incolores ou bleues (=bec Bunsen)
- Kirchhoff construit un spectroscope
- Kirchhoff effectue les mesures systématiques



Il n'y a qu'à...

There is more than meets the eye!

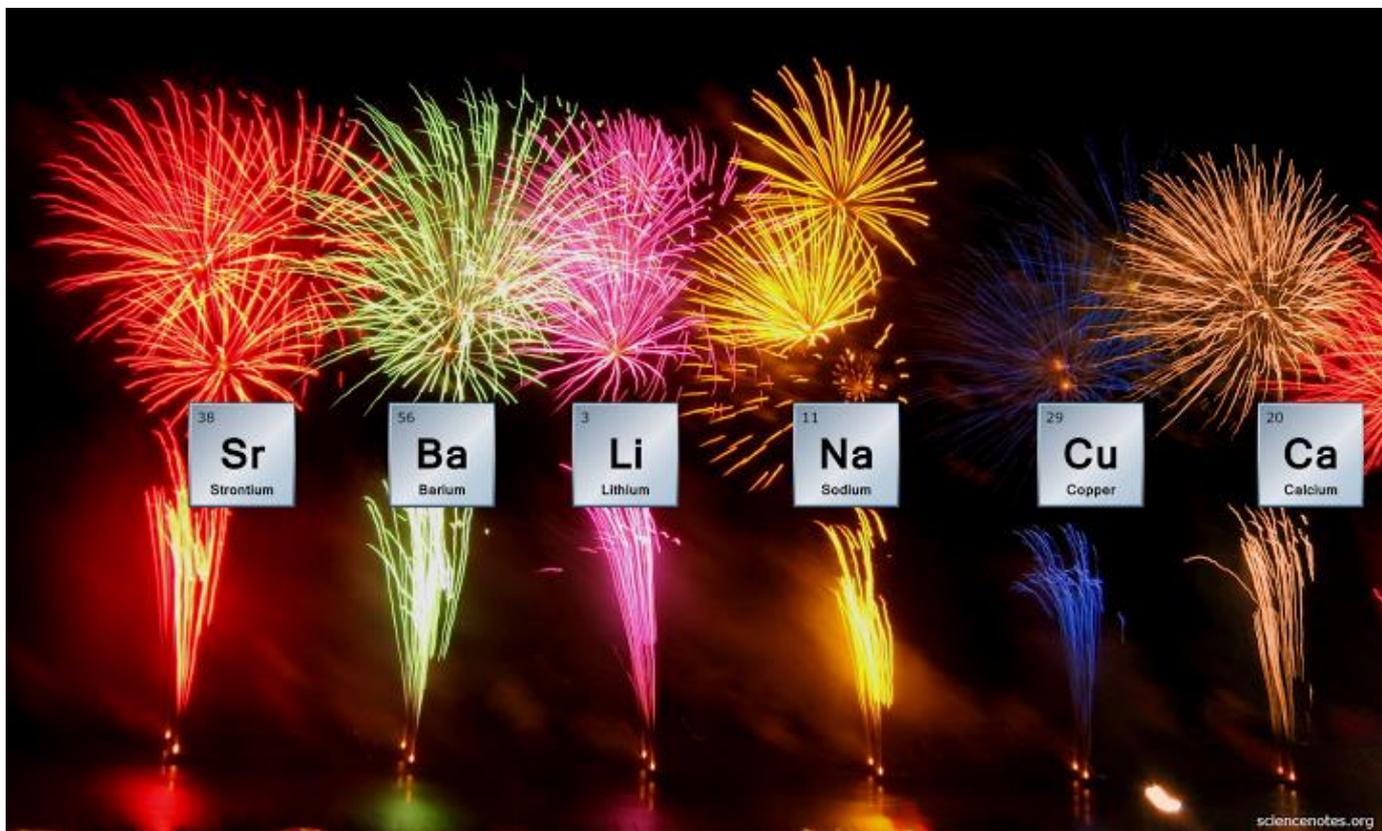


- Appliquer le savoir venant des tests de flamme
- Produire des feux d'artifice, qui fonctionnent, est **BEAUCOUP plus COMPLEXE**
- Garder le savoir-faire est **ESSENTIEL** («*ingénierie versus science*»)

# LES COULEURS DES FEUX D'ARTIFICE

Deux types d'effets sont utilisés pour les feux d'artifices:

- On brûle un métal, p.ex.:  $\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{MgO}$   
On observe des étincelles
- On excite des sel d'un métal (test de flamme), p.ex.:  $\text{CuCl}$   
On observe la couleur venant de l'émission



Le **principe est simple**:

- Ajouter un sel d'un métal avec la couleur (dans le test de flamme) souhaitée
- Problème résolue?

La **pratique est compliquée** et demande beaucoup de savoir-faire

- Garantir la pureté des mélanges (et des couleurs)
- Maintenir la couleur pendant la durée
- Garder les couleurs indépendamment de la température

Color / Effect	Element	
 <b>Green</b>	<b>Barium</b>	<b>BaCO<sub>3</sub>, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, BaSO<sub>4</sub></b>
 <b>Orange</b>	<b>Calcium Salts</b>	<b>CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub></b>
 <b>Blue</b>	<b>Copper</b>	<b>CuCO<sub>3</sub>, CuCl, CuO, CuSO<sub>4</sub></b>
 <b>Red</b>	<b>Lithium</b>	<b>Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, LiNO<sub>3</sub></b>
 <b>Bright White</b>	<b>Magnesium</b>	<b>Mg</b>
 <b>Gold</b>	<b>Sodium</b>	<b>Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
 <b>Red</b>	<b>Strontium</b>	<b>SrCO<sub>3</sub>, Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, SrSO<sub>4</sub></b>

Produire des feux d'artifice avec des couleurs vives est difficile et les producteurs ont souvent gardé leurs recettes:

- La qualité du résultat dépend de la **qualité** et de la **composition de l'explosif** (en principe du **poudre noir** aussi appelé poudre à canon!)
- La composition du **poudre noir varie largement**

charbon

15 %

30 %

soufre

10 %

40 %

salpêtre

75 %

(feux d'artifice)

40 %

(poudre de mine)



Theophilus Presbyter  
«mythique»



Roger Bacon  
(1214-1294)



Poudre à canon (=pouc  
Différentes granulosites

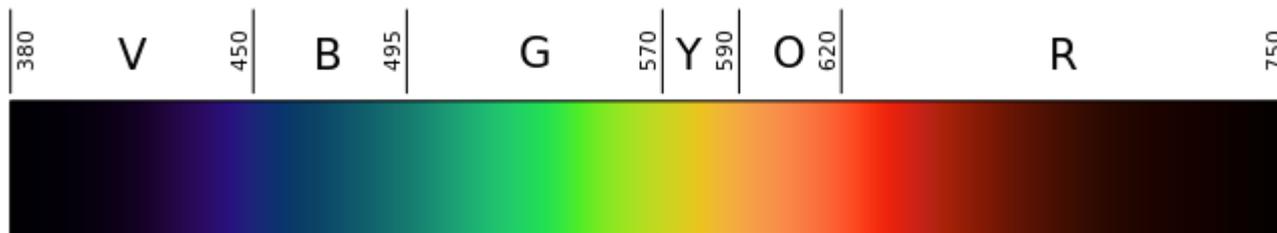
Produire des feux d'artifice avec des couleurs vives est difficile et les producteurs ont souvent gardé leurs recettes:

- La qualité du résultat dépend de la **qualité** et de la **composition de l'explosif** (en principe du **poudre noir** aussi appelé poudre à canon!)
- La composition du **poudre noir varie largement**

charbon	soufre	salpêtre	
15 %	10 %	75 %	(feux d'artifice)
30 %	40 %	40 %	(poudre de mine)
- La composition influence la **vitesse**, la **température** et la **chimie** de l'explosion
- Le **charbon de qualité** provient du bois d'arbres tels que le peuplier, l'aulne ou le tilleul par distillation à 350 °C
- Pour une combustion efficace, les trois composants doivent être **moulus** en poudres fines et **mélangés** de façon très **homogène (DANGER!)**
- Le poudre noir doit rester **sec**. **L'humidité influence négativement** les explosions

Quelques éléments concernant la chimie et l'émission des «**étoiles vertes**» (en anglais «**green star**») basé sur l'utilisation des sels de Barium:

- Le NIST (bureau des standards et de la technologie) a publié une liste avec
  - 240 lignes entre 400 et 700 nm pour le Barium (=Ba)
  - 100 lignes venant de Ba<sup>0</sup> et les autres du Barium oxydé (=chargé; p.ex. Ba<sup>+</sup>)
  - La majorité des lignes sont **(extrêmement) faibles**
  - Les lignes à **553.6 nm** pour Ba<sup>0</sup> et à **455.4 nm** pour Ba<sup>+</sup> sont les plus intenses, mais **toujours faible!**
- Les espèces responsable pour la couleur verte sont:
  - **BaCl<sup>+</sup>**: émissions 514 et 524 nm, **très intenses**
  - **BaOH**: émissions 487 et 512 nm (avec émission parasite à 740 nm)
  - **BaO**: émissions 549 et 564 nm (avec émissions parasites à 604 et 649 nm), **beaucoup plus faible!**

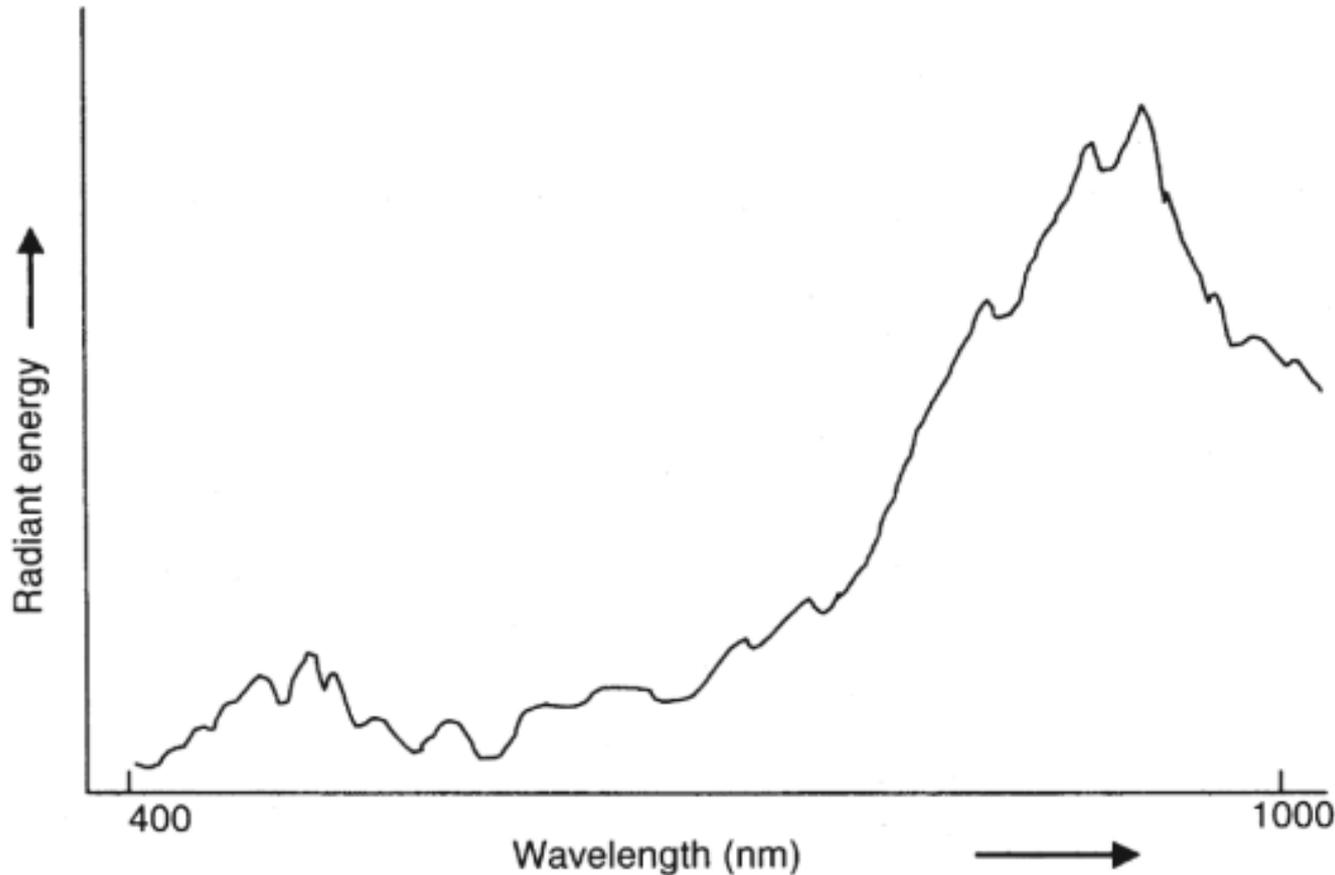


Couleurs en absorbance

Couleurs en emission

# LES COULEURS DES FEUX D'ARTIFICE

Comparer les spectres du **test de flamme** avec l'émission mesurée pour une **étoile verte**:



**Étoile verte !**

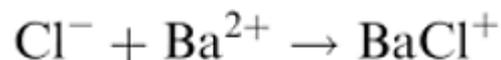


**Test de flamme  
raies d'émission**

Comparer les spectres du **test de flamme** avec l'émission mesurée pour une **étoile verte**:

- Les émissions de l' **étoile verte** sont larges
  - La superposition des émissions de **plusieurs espèces**
  - Des émissions à des **températures très différentes**
- L'obtention de la couleur verte exige de «contrôler» les espèces:
  - Ajout des **sources de chlorure**, p.ex.  $\text{KClO}_4$  pour former  **$\text{BaCl}^+$**
  - Ajout de sel de potassium (K) pour **supprimer la formation** de  **$\text{Ba}^+$  inactif!**

**Étoile verte !**

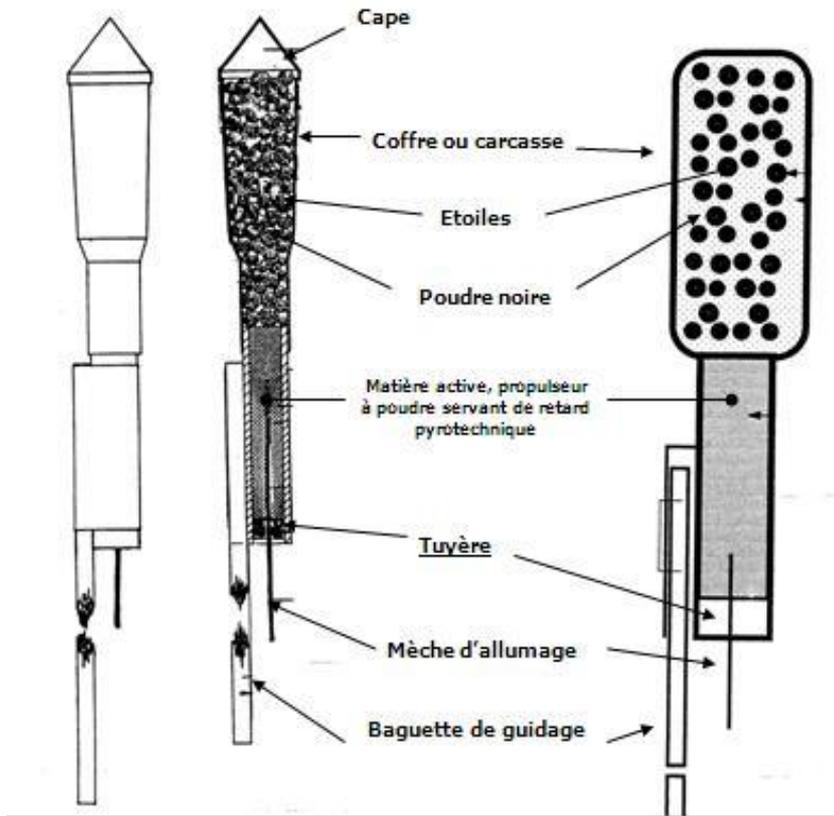


Conséquence:

Situation très complexe, bien maîtrisée par les experts

**There is more than meets the eye**

# Les fusées

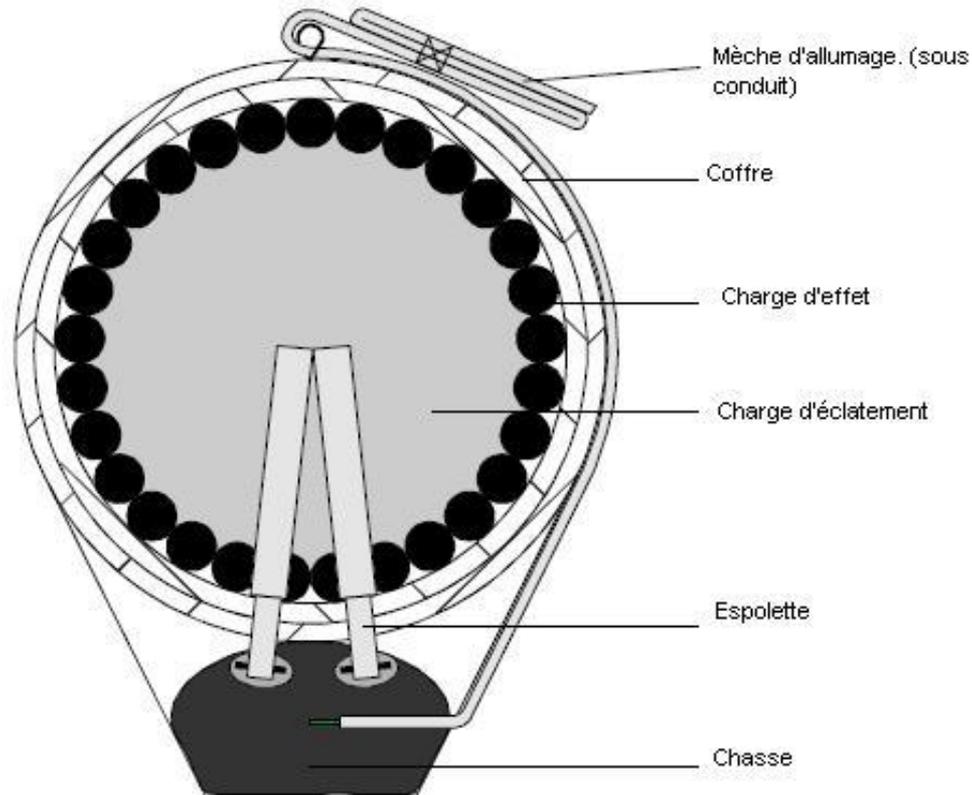


- Le départ de la fusée est délicat :  
Il faut qu'elle soit guidée dans sa montée tout en étant libre. (la baguette doit toujours pouvoir coulisser pour faciliter la propulsion).

- La baguette sert d'équilibrage lors de la montée de la fusée. Ainsi le coffre qui contient l'effet et la charge d'éclatement doit rester solidaire de la baguette.

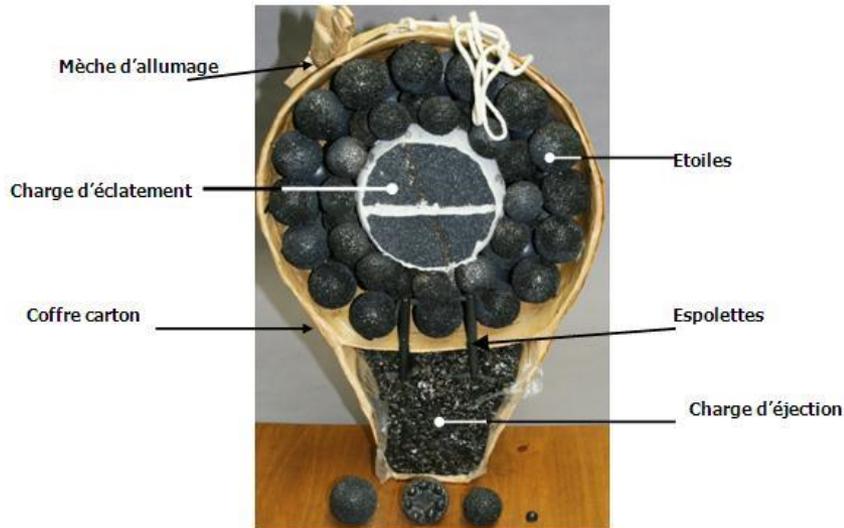
Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# Les bombes d'artifice



Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# Les bombes d'artifice



Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# Les étoiles



Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# LA FABRICATION D'UNE BOMBE



# Départ d'une bombe dans un mortier



Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# Découpe d'une bombe smiley



Nicolas Guinand & Thibault Prévot

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Reinhard Neier  
Institut de chimie  
Avenue Bellevaux 51  
CH-2000 Neuchâtel  
Reinhard.Neier@unine.ch  
[www2.unine.ch/chim](http://www2.unine.ch/chim)