

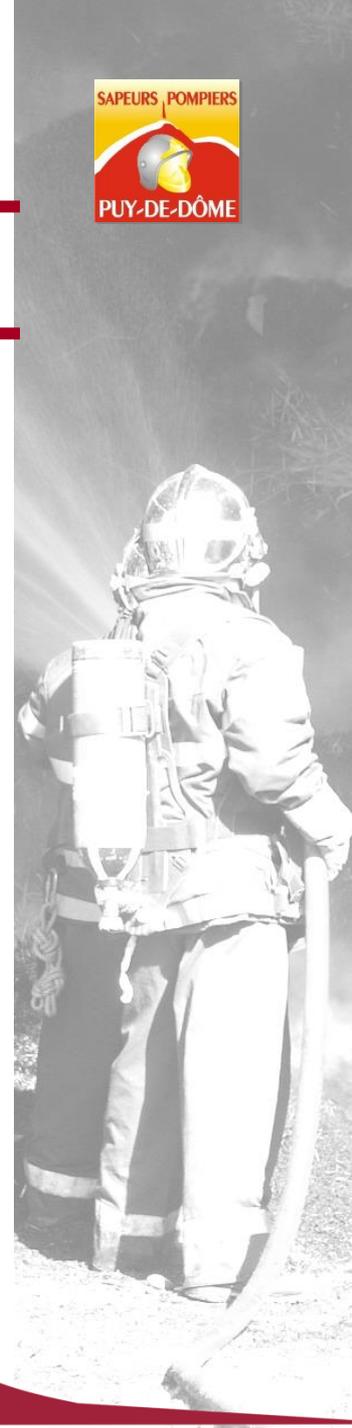
21/01/2017

Les fumées d'incendie Dangers et impacts

CCH JOUSSE Cyril

CSP Clermont-Ferrand

Service départemental d'incendie et de secours
du Puy-de-Dôme





Introduction - préambule

1. Le tétraèdre du feu
2. Les phases de développement du feu
3. Les différentes combustions
4. Dangers, calories et fumées
5. Feu de bois (polymère naturel)
6. Feu de polymère synthétique (PVC, etc.)
7. Conclusion – mots-clés

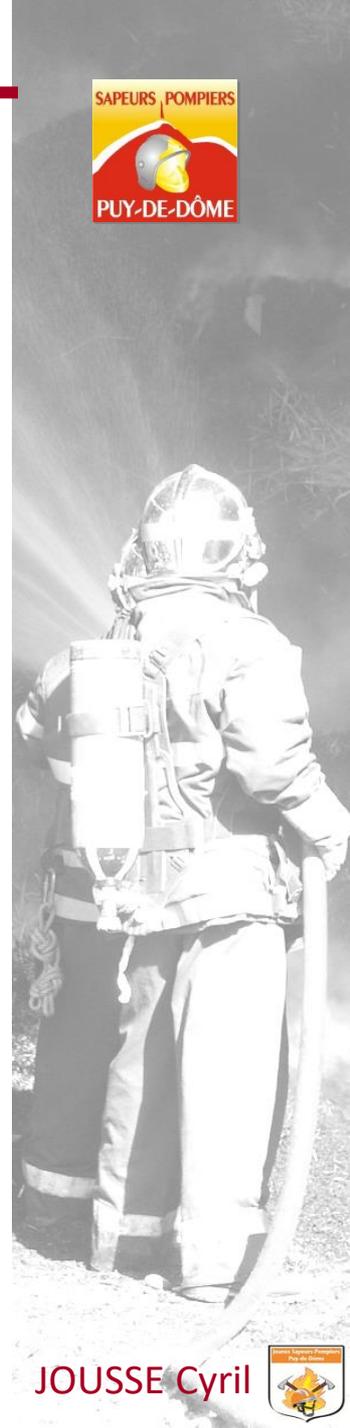


Préambule

- Bonjour !!
- Toutes les informations sont disponibles librement, certaines en anglais.
- Etat des lieux à ce jour, mais la science avance tous les jours.
- Les fondamentaux sont toujours vrais.

On appelle « feu » l'oxydation exothermique (combustion) rapide, produisant de la chaleur et une lumière d'intensité variable.

Tout bâtiment ou construction est vulnérable au feu, il importe donc que des mesures et des dispositions préventives soient mises en œuvre pour que tous les occupants soient à même de prendre les mesures immédiates (...). Il est important de savoir que lors d'un incendie, l'intoxication par les fumées constitue la cause de décès la plus fréquente (plus de la moitié des décès). (...) Il ne faut pas oublier non plus que les fumées et les suies d'incendies provoquent de gros dégâts au niveau matériel (et environnemental).



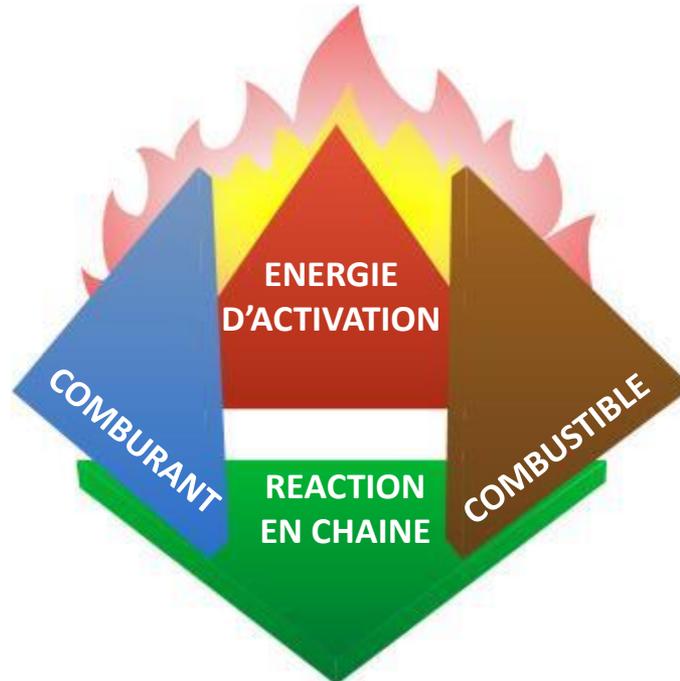
Le tétraèdre du feu



- Avant 1980 : le triangle du feu.
- Après 1980 : le tétraèdre du feu. La production des radicaux libres est indispensable à la réaction (en chaine).

ENERGIE D'ACTIVATION :

Flamme, chaleur, électricité, etc.



COMBURANT :

Air (oxygène)

Solide, liquide (ou solide liquéfiable), gaz ou métal.

REACTION EN CHAINE :

Déstructuration moléculaire, formation de radicaux.

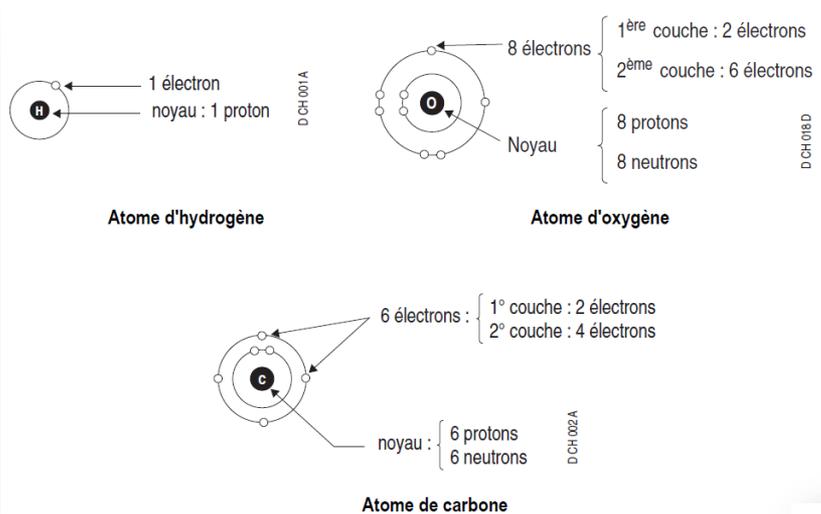


- Les radicaux libres :

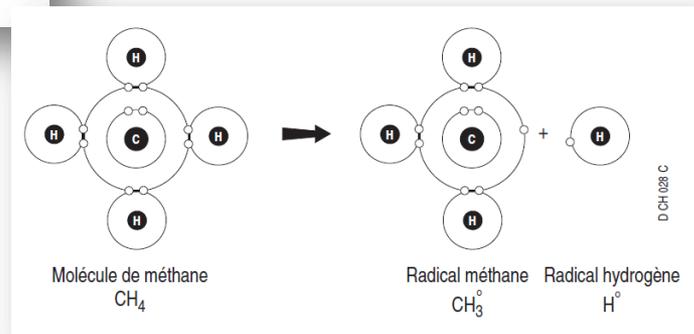
Chimie radicalaire : rupture de liaison (chimique) covalente, formation d'un élément à courte durée de vie et (donc) qui réagit rapidement avec toute autre molécule au voisinage.



LES ATOMES ET LES LIAISONS

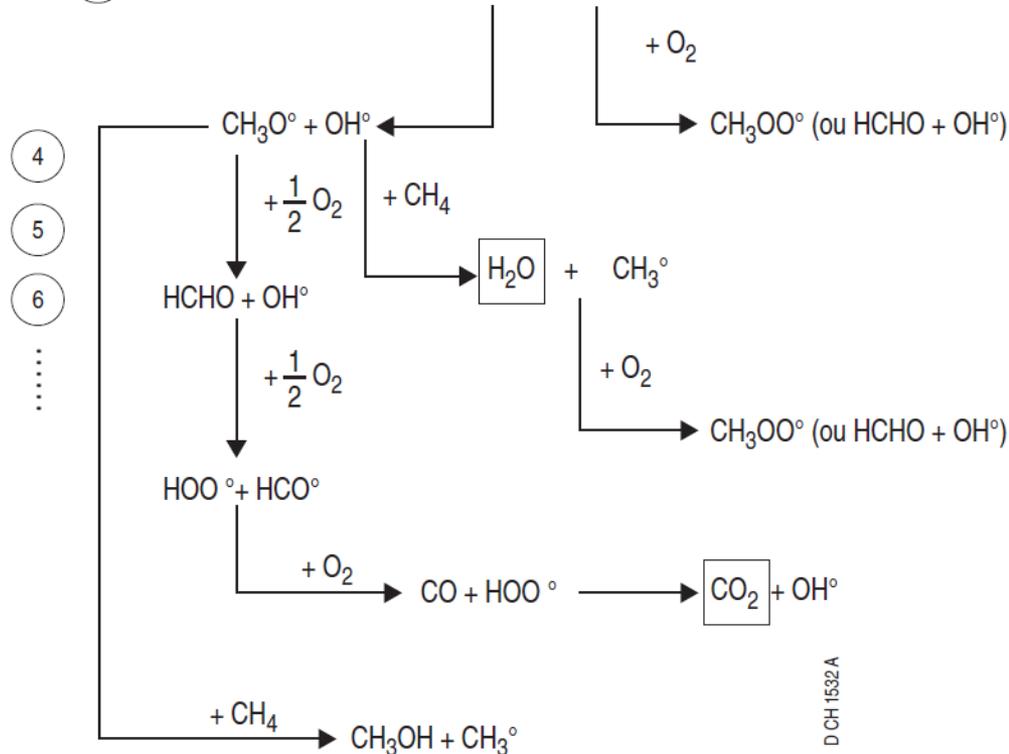
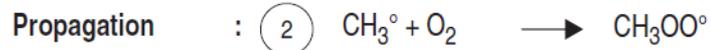
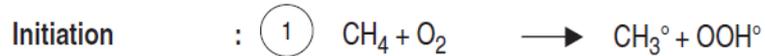
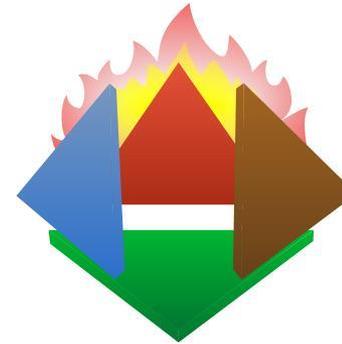


LES MOLÉCULES ET RADICAUX



- Les radicaux libres :

Chimie radicalaire : cas de la combustion du méthane.

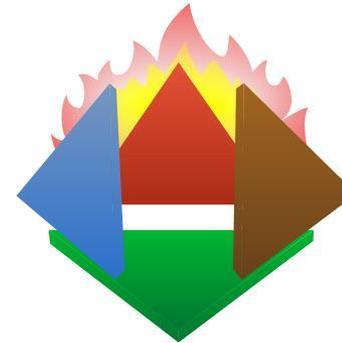


Le tétraèdre du feu

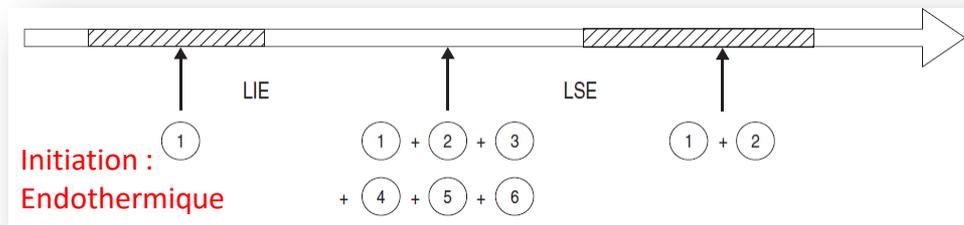


- Les radicaux libres :

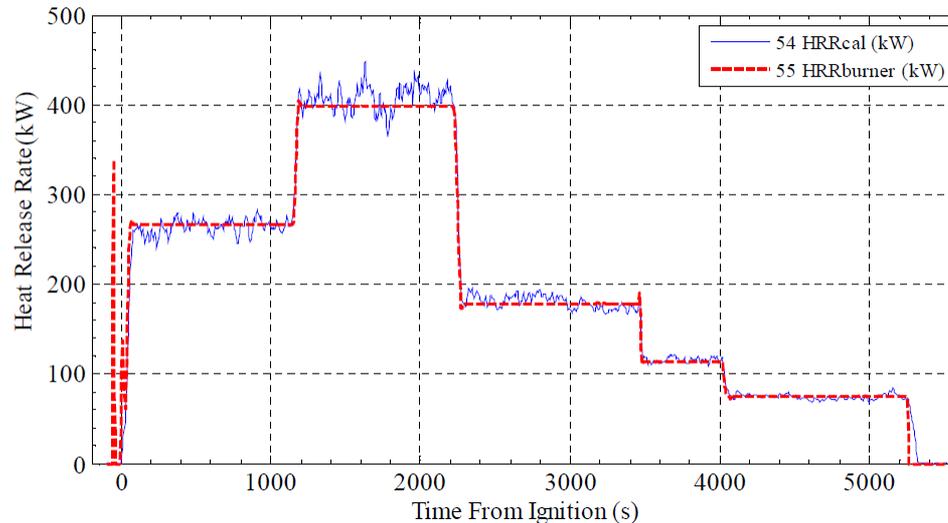
Chimie radicalaire : cas de la combustion du méthane.



Propagation & ramification :
Exothermiques



Exothermie : mesure sur du gaz naturel (enceinte pilote)



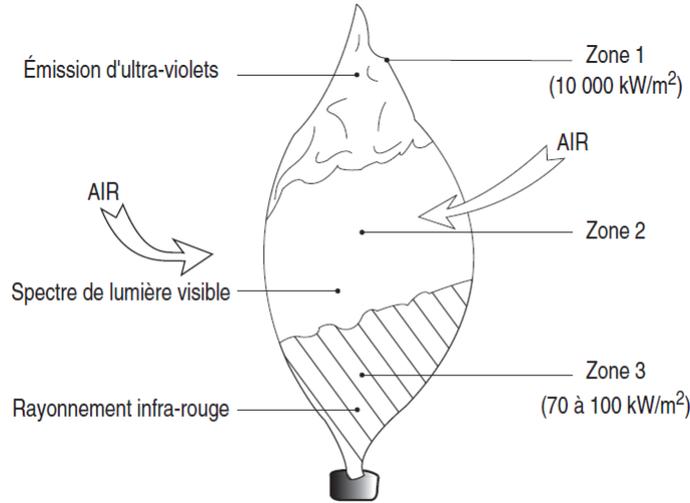
JOUSSE Cyril



Les phases de développement du feu



- Une flamme : représentation simplifiée



Composition structurelle théorique d'une flamme

D CH 3004 A

Combustion complète

Combustion incomplète (imbrulés incandescents)

Combustion très incomplète (manque d'oxygène, faible température)

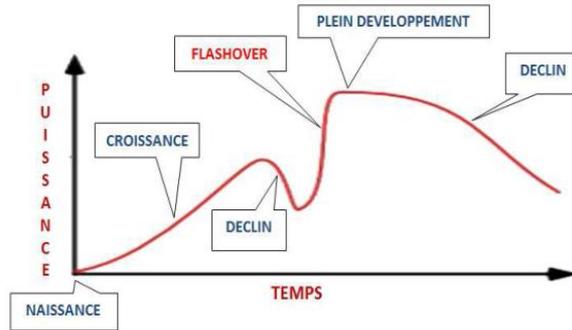
- Différents types de flammes



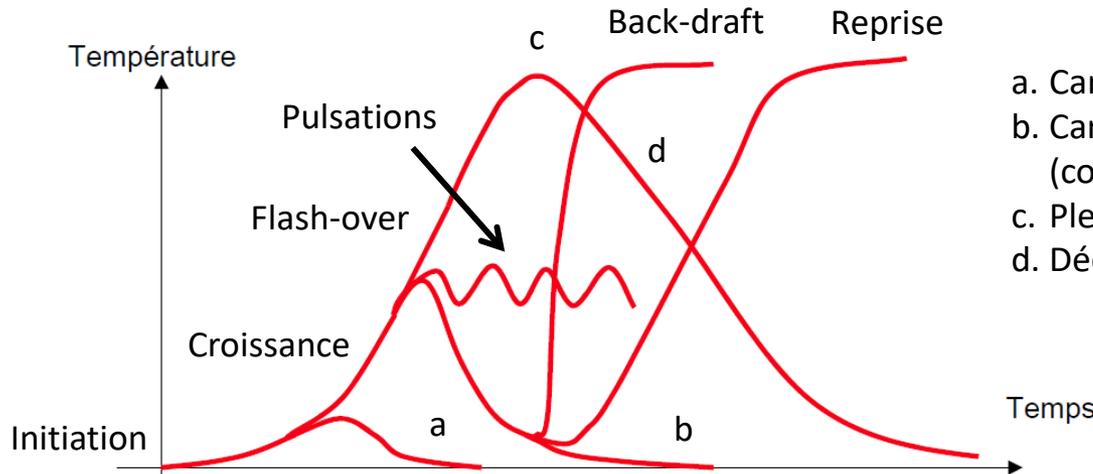
Les phases de développement du feu



- Un incendie : courbe de développement du feu



- Un incendie : les évolutions possibles



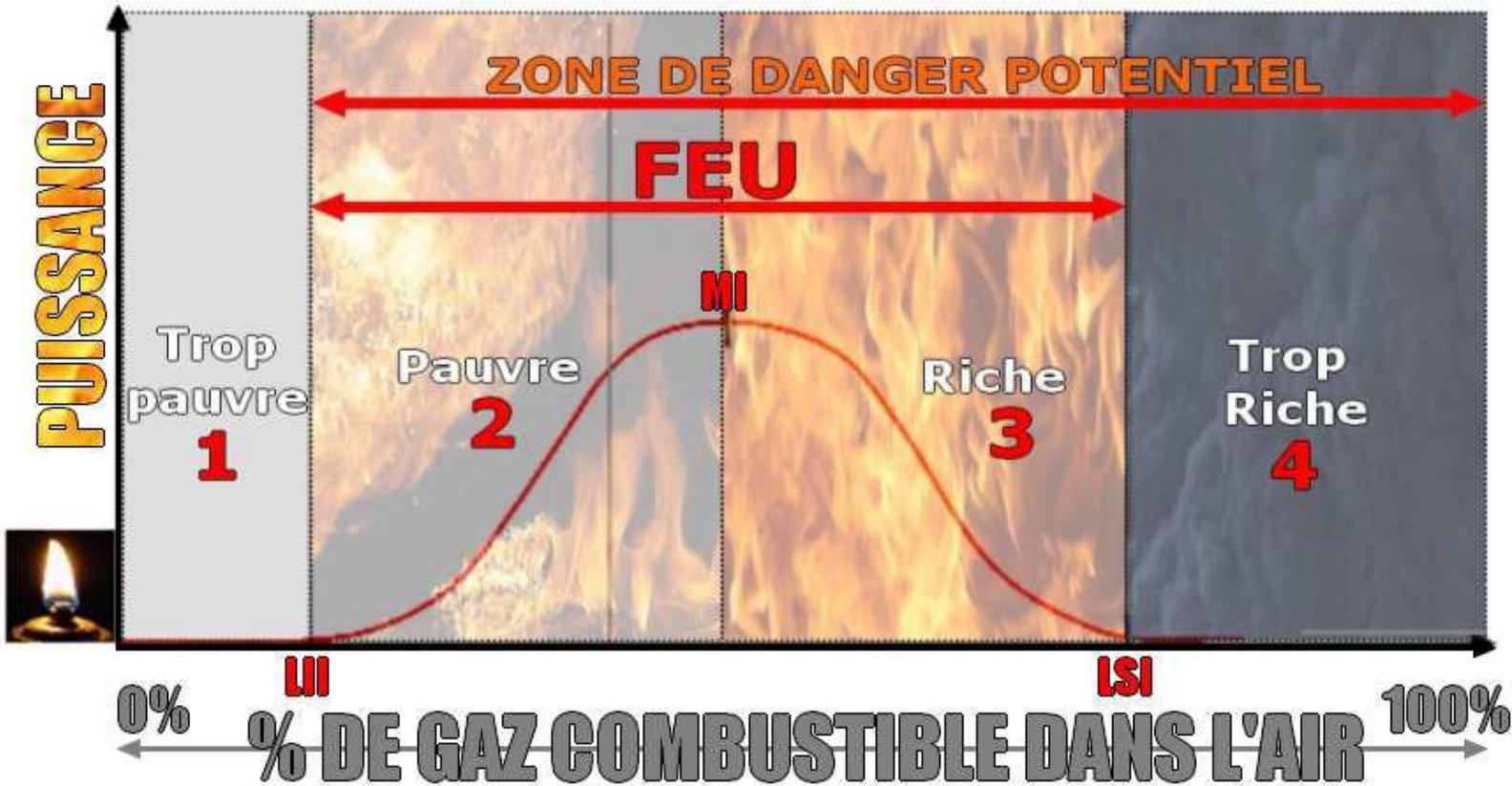
- Extinction :
- a. Carence de combustible
 - b. Carence de comburant (combustion incomplète)
 - c. Pleinement développé
 - d. Déclin

Figure 1 : les évolutions possibles d'un incendie en milieu confiné

Les phases de développement du feu



- Un incendie : plages d'inflammabilité



Les phases de développement du feu



- Un exemple : la combustion du bois

1. **Evaporation** de l'eau (100°C)
2. **Pyrolyse** du combustible (200-600°C), en absence d'oxygène. Production de résidu charbonneux et de produits volatils.
3. Flammes de **diffusion** (à partir de 300-350°C et au-delà), en présence d'oxygène. Les produits volatils, gaz permanents (CO₂, H₂O), gaz (CO, H₂, CH₄, NH_x) et particules combustibles s'enflamment (combustion homogène). Des gaz condensables (jus pyroligneux; goudrons, acides, alcools et cétones) brûlent à partir de 550°C.
4. Les **braises** (résidus charbonneux rougeoyants, 800°C) évoluent en cendres, en présence d'oxygène (combustion hétérogène; production de CO et CO₂).

- Le combustible se **vaporise** (liquide – gaz) ou se **sublime** (solide – gaz) par décomposition chimique.
- **Seuls les gaz s'enflamment. Tous les gaz et toutes les particules ne s'enflamment pas.**



Les différentes combustions



Hors contexte

- Combustion lente (activité cellulaire; fermentation, compostage; acier)
- Combustion vive (présence de flammes)
- Combustion très vive ou instantanée (déflagration, détonation)

Contexte incendie

- Combustion **complète** (CO₂, H₂O et minéraux; gazinière)
- Combustion **incomplète** (idem + composés volatils et particules)

Caractéristiques de combustion

- Pouvoir **calorifique** (quantité de chaleur, kJ/g ou MJ/kg)
- Pouvoir **fumigène** (volume de fumées, en m³/kg)



Les différentes combustions



- Combustion complète (CO_2 , H_2O et minéraux)

Phénomène idéal, peu rencontré. Combustion uniquement de carbone et d'hydrogène (composés organiques : C, H, O) en présence d'oxygène non limitant. La combustion du soufre produit SO_2 , l'azote ne s'oxyde pas.

- Combustion incomplète (idem + composés volatils et particules)

*Elle a lieu quand **la quantité de comburant est insuffisante** pour permettre la réaction complète du combustible ou lorsque le temps de contact, à une température rendant la combustion possible, est trop faible.*

*Elle produit des **résidus de combustion** (sous forme de cendres) et émettent des fumées : certains composés, tels que monoxyde de carbone (gaz mortel), particules de carbone pur (suie, goudron, cendres), oxydes d'azote (NO_x), hydrocarbures (du benzène cancérigène par exemple) sont très toxiques pour l'homme et pour l'environnement, ou fortement toxiques comme les HAP ou les composés organiques volatils (COV).*

***La réaction de combustion est habituellement incomplète.** Seul le contrôle des conditions permet d'obtenir une combustion complète, en apportant un excès de dioxygène à haute température par exemple.*





- ***Pouvoir calorifique: (en kJ/kg ou kJ/m³)***

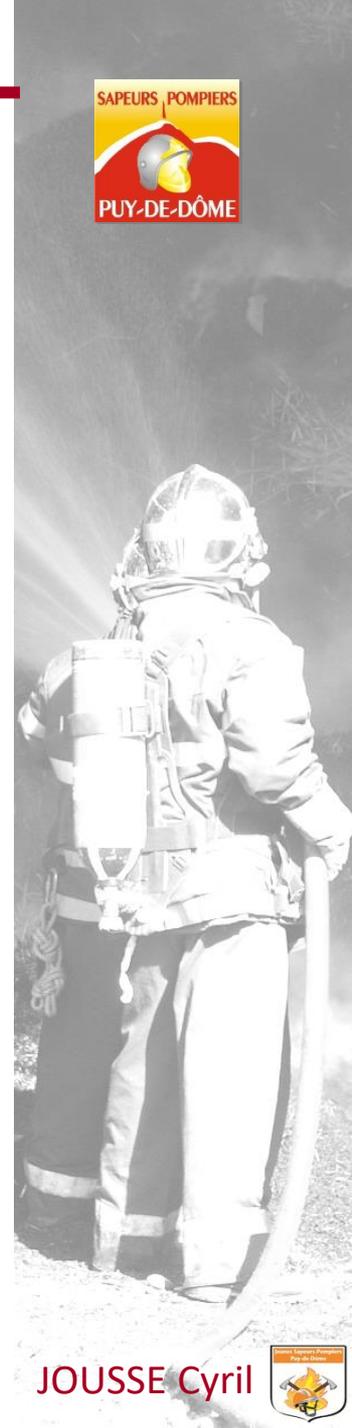
C'est la quantité maximale de chaleur que peut dégager l'unité de masse ou de volume pour une combustion complète.

- ***Charge calorifique: (en kJ pour une zone)***

C'est la quantité totale de chaleur que peuvent dégager l'ensemble des combustibles présents dans un espace déterminé (une pièce par exemple)

- ***Potentiel calorifique: (en kJ/m² pour une zone)***

C'est la charge calorifique rapportée à la surface au sol de l'espace considéré.



Dangers, calories et fumées



- Pouvoir calorifique

PCI : pouvoir calorifique inférieur (énergie dégagée par le matériau sec).

Déchets	PCI (10 ⁶ J/kg)
Produits du bois :	
- copeaux	5 à 13,4
- sciures	10 à 15,5
- stratifiés décoratifs	15,9 à 18,8
- panneaux fibres et particules	18,8 à 19,2
- contreplaqué ordinaire	18,8
- contreplaqué ignifugé	14,2 à 14,6
- aggloméré bois ciment	5 à 6,3
Carton :	
- carton ordinaire	15,5 à 16,7
- emballage lait	26,3
Papier :	
- papier kraft	16,7
- papier goudronné	25,5
- papier plastifié	17,1
- papier ordinaire	16,3
- déchets	16,7
Textiles :	
- coton	16,7
- laine et soie	19,2 à 20,5
- feutre	23 à 23,4
linoléum	20,9 à 25,5
Matières plastiques :	
- polychlorure de vinylidène	10,8
- vinylidène	18,4
- PVC rigide	20,9
- PVC souple	22,1
- déchets de PVC	18,8
- néoprène	25,1
- ABS	34,7
- polystyrène	41,4
- polypropylène	41,8
- polyéthylène	46



- Pouvoir fumigène

Sur fumées sèches (eau libérée), dégagement de CO_2 et N_2 (en théorie), ou sur fumées humides (eau dans les fumées). On peut en déduire la quantité de CO_2 .

*La production de fumée correspond à la production d'un **mélange complexe constitué de particules et de gaz** de combustion. (...) La production de gaz toxiques et corrosifs se réalise sous l'effet de deux mécanismes : la pyrolyse et la combustion.*

*La liste des produits chimiques identifiables dans les fumées d'incendie dépasse **plusieurs milliers de dérivés**, issus des molécules qui composent les matériaux en feu. Les toxiques présents dans les fumées d'incendies peuvent avoir de multiples effets (toxicité neurologique centrale ou cardio-vasculaire, effets irritants ou caustiques sur les muqueuses des voies respiratoires). **Les suies** sont responsables de véritables dépôts de particules dans les bronches. En plus de leurs effets directs (thermiques, obstructifs et irritants), elles sont susceptibles de capter les gaz toxiques qu'elles libéreront secondairement.*

- Avec les fumées des risques d'intoxication / asphyxie, d'explosion (back-draft) et de propagation / reprise du feu (flash-over) sont à prendre en compte.



On peut résumer les dangers des fumées par le COCMIX

C :	Chaudes
O/C :	Opaques/Clares
M :	Mobiles
I :	Inflammables
X :	Toxiques



Chaudes: Plus les fumées sont chaudes, plus elles sont légères. Dans un local, elles auront tendance à se stratifier. Les différentes couches de fumées correspondent à différentes densités, donc à différentes températures.

Ex : Les gaz issus de la pyrolyse sont plus lourds puisque plus froids.

Opacité / Clarté : la couleur nous informe sur la quantité de chaleur contenue. Plus elles sont chaudes, plus elles sont sombres et opaques (chargée en particules imbrulées).

La couleur indique l'origine des fumées (matériau pauvre ou riche). Une fumée claire peut être issue des gaz de pyrolyse. Une fumée sombre est issue d'une combustion vive incomplète. L'opacité des fumées est liée à leur teneur en particules imbrulées, suies, carbone, aérosols...



Dangers, calories et fumées



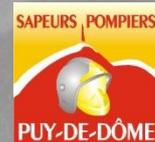
- **Mobile** : les fumées peuvent être laminaires ou turbulentes. Plus elles sont chaudes, plus elles sont dilatées et plus elles sortent vite du volume sinistré (Rapport chaleur / pression). C'est ce qu'on appelle la vitesse.
- **Inflammable** : En fonction de leur plage d'inflammabilité et de leur quantité, les fumées, donc les gaz, sont inflammables voire explosif.
- **toXique** : De part la composition de chaque matériaux qui brûle, différents composés se dégagent extrêmement nocif pour la santé voire mortel (asphyxiants, irritants,)

Ne jamais oublier que « La nature a horreur du vide » => La quantité de gaz qui sort est équivalente à la quantité d'air entrant.



La vélocité des fumées





PAUSE !!



JOUSSE Cyril



Major biomarker tracers in smoke from biomass burning

Compound	Composition	Indicator for source
Anisic acid (p-methoxy-benzoic acid)	$C_8H_8O_3$	Gramineae lignin
Vanillic acid	$C_8H_8O_4$	Lignin
Syringic acid	$C_9H_{10}O_5$	Angiosperm lignin
Matairesinol	$C_{20}H_{22}O_6$	Conifer lignin ^c
Shonanin	$C_{20}H_{24}O_5$	Conifer lignin ^c
Divanillyl	$C_{16}H_{18}O_4$	Lignin dimer
Divanillylmethane	$C_{17}H_{20}O_4$	Lignin dimer
Divanillylethane	$C_{18}H_{22}O_4$	Lignin dimer
Vanillylsyringyl	$C_{17}H_{20}O_5$	Angiosperm lignin dimer
Disyringyl	$C_{18}H_{22}O_6$	Angiosperm lignin dimer
Dianisyl	$C_{16}H_{18}O_2$	Gramineae lignin dimer
Levoglucosan	$C_6H_{10}O_5$	Cellulose
Mannosan	$C_6H_{10}O_5$	Hemicellulose
Galactosan	$C_6H_{10}O_5$	Hemicellulose
1,4:3,6-Dianhydro-β- D-glucopyranose	$C_6H_8O_4$	Cellulose
Dehydroabietic acid	$C_{20}H_{28}O_2$	Conifer resin
<i>n</i> -Nonacosan-10-ol	$C_{29}H_{60}O$	Wax ^c
3-Methoxyfriedelane	$C_{31}H_{54}O$	Angiosperm ^c
Abietic acid	$C_{20}H_{30}O_2$	Conifer resin ^c
Pimaric acid	$C_{20}H_{30}O_2$	Conifer resin ^c
iso-Pimaric acid	$C_{20}H_{30}O_2$	Conifer resin ^c
Sandaracopimaric acid	$C_{20}H_{30}O_2$	Conifer resin ^c
Cyclopenta[c,d]pyrene	$C_{18}H_{10}$	PAH all burning
Retene	$C_{18}H_{18}$	Conifer
Pimanthrene	$C_{16}H_{14}$	Conifer
Simonellite	$C_{19}H_{24}$	Conifer
Acetosyringone	$C_{10}H_{12}O_4$	Angiosperm lignin
Syringyl acetone	$C_{11}H_{14}O_4$	Angiosperm lignin
Oleana-2,12-diene	$C_{30}H_{48}$	Angiosperm
Ursana-2,12-diene	$C_{30}H_{48}$	Angiosperm
Oleana-2,12-dien-18-oic acid	$C_{30}H_{46}O_2$	Angiosperm



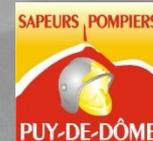
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), oxydes d'azote (NO_x), méthane (CH₄), composés organiques volatiles (COV), cyanures (HCN), protoxyde d'azote (N₂O), etc. .

➤ Exemple en feu de forêt :

- Fumée blanche
- Fumée blanche et grise
- Fumée grise
- Fumée rousse et noire
- Fumée noire, moutonnante



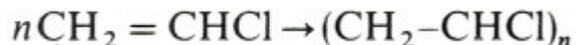
Feu de polymère synthétique (PVC, etc.)



- Composition du matériau

Table 1. Fuel Composition and Properties

property	PS	PE	PVC
fixed carbon (%)	1	0	9
volatiles (%)	99	100	91
ash (%)	0	0	1
carbon (%)	92	86	38
hydrogen (%)	8	14	5
sulfur (%)	0.04	0	0
chlorine (%)	0	0	57
nitrogen (%)	0	0	0
oxygen (%)	0	0	0
heat value (MJ kg ⁻¹)	44.5	40.5	19.2



- Déformation du matériau

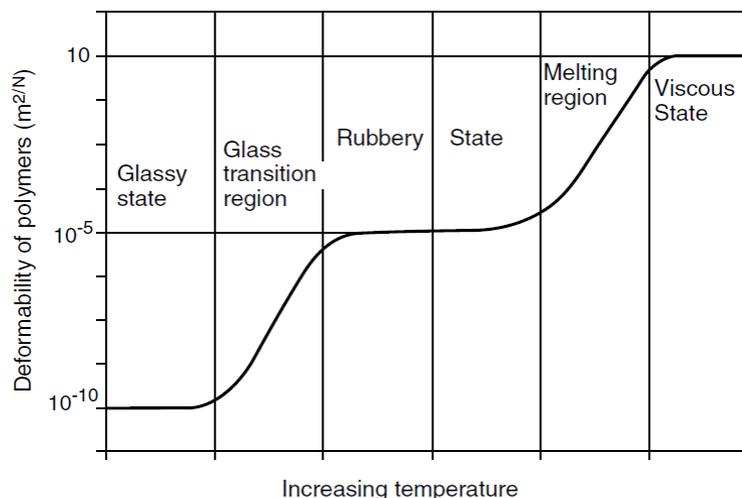


Figure 1-7.2. Idealized view of effect on deformability of thermoplastics with increasing temperature.

- Emission de composés volatils

Table 1. Compounds identified in pyrolysis and thermo-oxidation products of poly(vinyl chloride) and some vinyl copolymers²⁰

Compound	Pyrolysis	Thermo-oxidation
Carbon dioxide	+	+
Chloromethane	++	-
Cyclopentane	+	-
Cyclopentadiene	+	-
Cyclohexadiene	+	-
Benzene	++	++
Toluene	++	++
Dioxane	++	-
Xylene	++	+
Styrene	+	-
Methyl styrene	+	-
Indene	++	-
Naphthalene	++	+
Butadiene	+	-
Vinyl chloride	+	-
Acetaldehyde	+	-
Methylcyclopentene	+	-
Chlorobenzene	++	++
Divinylbenzene	++	++
Cyclopentene	+	-
Trichloroethylene	+	-
Chloroethane	+	-
Chloropropene	+	-
Propanal	+	-
Methyl ethyl cyclopentane	++	-
Trimethyl cyclopentane	+	-
Methyl cyclohexene	+	-
Methyl indane	+	-
Cyclohexene	+	-
Trimethylbenzene	+	-
Dichloroethylene	+	+
Acrylonitrile	+	-
Hexadecylene	-	+
Diphenylbutylene	-	+
Hydrogen chloride	++	++

++: Main components.

+: Other products present in amounts less than 2% of total products.

-: Not detected.



Feu de polymère synthétique (PVC, etc.)

- Emission de composés volatils

PVC rigide (+/- additifs; protection UV, retardants de flamme, minéraux, pigments, biocides, ...) ou flexible (+ plastifiants).

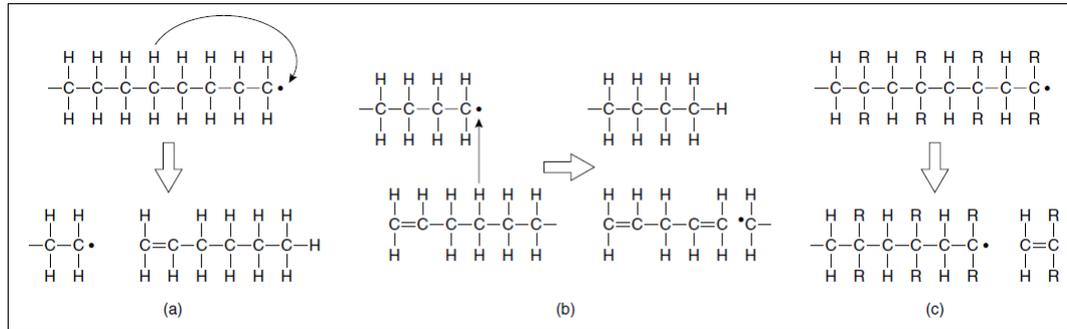


Figure 1-7.7. (a) Intramolecular H transfer, (b) intermolecular H transfer, (c) unzipping.

Production d'HCl et de dioxines (aromatiques oxygénés, et parfois chlorés), d'HCN, de zinc, cadmium, plomb, calcium et barium (additifs).

Fumées de couleur blanche (PE, mousses) ou noire (caoutchouc, PVC, PS).

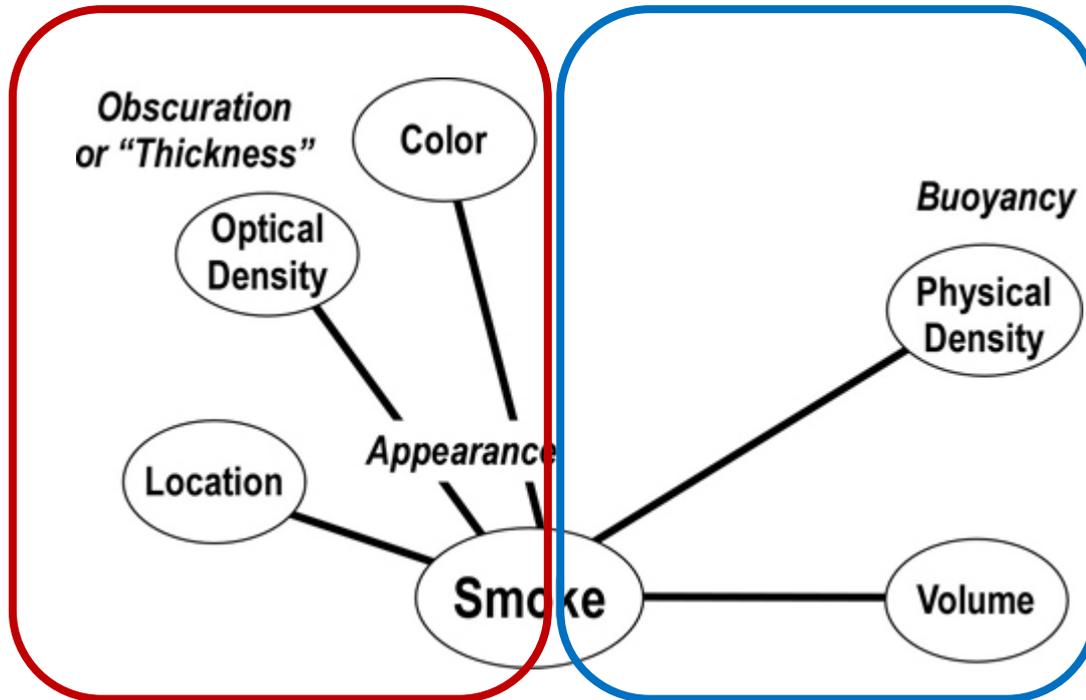


Conclusion – mots-clés

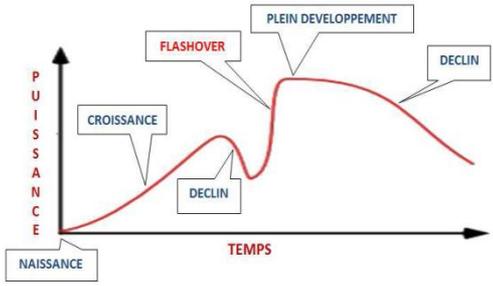
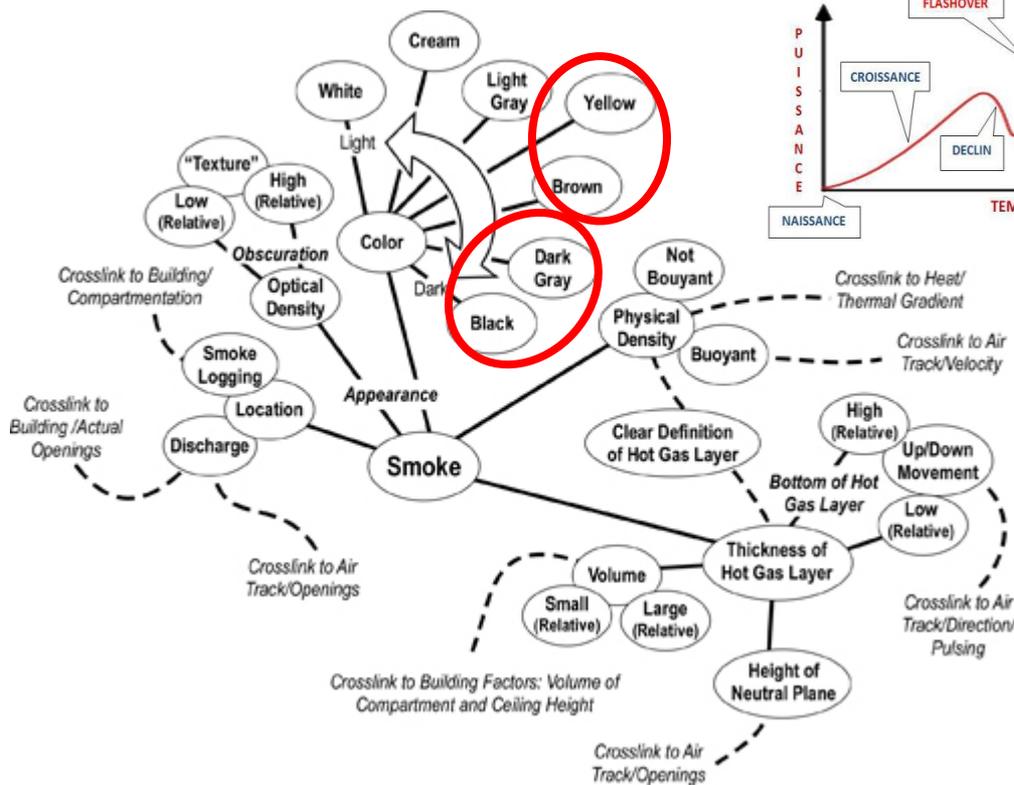


Particules

Gaz



Conclusion – mots-clés





- Les fumées sont un paramètre à part entière de la lecture du feu, outil privilégié de tout pompier engagé dans un volume sinistré.
- Au même titre que les sons, la chaleur, les ouvrants et les flammes, les caractéristiques propres aux produits de combustion et de pyrolyse nous renseignent sur la dynamique du feu.
- Leur densité, leur couleur, leur vitesse de déplacement, leur hauteur sous plafond, la présence de flammes à l'intérieur, etc nous fournissent de précieuses informations sur la puissance du foyer et sur l'évolution du développement de l'incendie.





- www.cusstr.ch - Danger incendie (2006)
- INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné (2007)
- INERIS ETUDE N° 02-0128/1A (2004)
- PHÉNOMÈNES DE LA COMBUSTION - ENSPM Formation Industrie - IFP Training (2005)
- Christophe HUON – Le bois-énergie dans les agglomérations. Colloque CIBE (2008)
- www.fr.ch - Givisiez, SFF, F. Vienne, W. Eyer (2007)
- Cours de combustion 2ième partie - Christian Guilié (2012)
- LA COMBUSTION DU BOIS ET SES IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR. Jean-Pierre SAWERYSYN. Air Pur - N°81 (2012)
- Thermal Decomposition of Polymers. Beyler & Hirschler (2002)
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion?oldid=132626991>
- FIRE AND MATERIALS VOL. II, 131-142 (1987)
- Developments in Environmental Science, Volume 8. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. Urbanski et al. (2009)
- NIST Technical Note 1483. Bundy et al. (2007)
- C. Lampin Cabaret et al. Prototype d'une échelle d'intensité pour le phénomène " incendie de forêt ". Ingénieries - E A T, IRSTEA Édition (2002)
- <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=730> (Ed Hartin)

