Combustions, flammes et sécurité

INTRODUCTION.

Les phénomènes de combustion sont relativement peu abordés dans l'enseignement. Dans les lycées, on évoque les combustions vives et les combustions lentes. Dans le nouveau programme de seconde, les indications fournies se limitent généralement à l'identification des produits de la combustion.

Ainsi, après amorçage de la réaction, le soufre, le carbone, le phosphore brûlent dans l'oxygène et donnent des oxydes acides. Le sodium et le magnésium brûlent de même en donnant des oxydes basiques. Le fer aussi brûle dans l'oxygène en donnant des oxydes insolubles. L'hydrogène brûle dans l'oxygène ou dans l'air en donnant de l'eau. H_2S brûle dans l'air en donnant de l'eau et un oxyde acide.

L'oxydation lente à froid d'un morceau de phosphore blanc dans l'air ou dans l'oxygène est qualifiée de combustion lente. Naturellement, on peut aussi, en sciences naturelles, se référer à la respiration comme autre exemple de combustion lente.

Il est difficile, à ce niveau, de faire ressortir que les *combustions sont des réactions d'oxydo-réduction fortement exothermiques* : le combustible est le réducteur, l'oxydant constitue le comburant ; la réaction, généralement après amorçage (allumage), se poursuit d'elle-même et la chaleur de réaction se transmet pour l'essentiel aux produits de la réaction et peut rendre incandescentes des particules solides, comme c'est le cas lors de la combustion de métaux. Suivant leur température de fusion, on peut même obtenir des métaux fondus.

Le nouveau programme de première aborde, à propos des alcanes pris comme exemples d'hydrocarbures, leur combustion et leur chloration qui sont des réactions vives. Il ne m'a toutefois pas encore été donné de voir comment sont traitées ces questions.

Enfin, en Terminale, le programme doit porter essentiellement sur quelques mécanismes réactionnels.

Dans l'enseignement supérieur, on ne parle généralement pas des phénomènes de combustion en tant que tels. Ils peuvent toutefois constituer un exemple important de *réactions rapides en chaînes* dans un cours de cinétique chimique. On évoque alors

les trois étapes principales d'*initiation* des réactions, par attaque par des radicaux H ou OH, qu'il faut créer, puis de propagation et enfin de recombinaison. En fait, on ne connaît bien l'ensemble des réactions intermédiaires que dans des cas simples : la combustion de l'hydrogène et celle du méthane (exemple développé dans le tableau I).

Chaque réaction est caractérisée, à une température considérée, par deux constantes de vitesse, celle de la réaction directe (dans le sens de la gauche vers la droite) et celle de la réaction inverse. La vitesse du phénomène *global* est, en fait, celle de son étape la plus lente. Cette vitesse de réaction a généralement un expression compliquée qui ne permet pas de définir un *ordre de réaction simple :* cet ordre est souvent fractionnaire et il varie au cours de la réaction qui tend à s'accélérer (on parle d'*auto-catalyse*). En clair, cela signifie que la vitesse de la réaction qui est grande croît dangereusement et cela peut nous conduire à une *explosion.*

TABLEAU I

1re phase : initiation (création de radicaux)

(1) $2\,O_2 + 2\,H \rightleftarrows 2\,OH + 2\,O$

(2) $CH_4 + OH \rightleftarrows CH_3 + H_2O$

2me phase : propagation

(3) $CH_3 + O_2 \rightleftarrows CH_2O + OH$

(4) $CH_2O + O \rightleftarrows CHO + OH$

(5) $CHO \rightleftarrows CO + H$

(6) $CO + OH \rightleftarrows CO_2 + H$

(7) $2\,OH \rightleftarrows H_2O + O$

3me phase : recombinaison

(9) $O + O +$ tiers corps (paroi ou N_2) $\rightleftarrows O_2 +$ tiers corps (ayant absorbé de l'énergie)

Réaction globale (somme des réactions successives)

$CH_4 + 2\,O_2 \rightleftarrows 2\,H_2O + CO_2$

Pourtant, le chimiste est quelqu'un qui sait jouer avec le feu sans se brûler, ni mettre les autres en danger. Il tient compte pour cela de connaissances de base, que nous allons essayer de préciser (1).

(1) A titre d'introduction, il est intéressant de projeter le film « La combustion », version française du film « Combustion » de N.-W. RAKESTRAW de l'Université de Californie, distribué par le service du Film de Recherche scientifique C.N.D.P., 96, boulevard Raspail, 75006 Paris.

LA COMBUSTION DES GAZ.

Considérons un gaz combustible, par exemple un hydrocarbure tel que du butane. Il est gazeux à la température et à la pression ordinaires. Pour le faire brûler, il faut lui fournir un comburant : de l'air, et il faut allumer la flamme à l'aide d'un point chaud : une allumette (enflammée) (2).

Deux cas sont à considérer :

Premier cas :

On fait arriver le butane dans l'air et on allume le jet directement à la sortie de la buse (le brûleur proprement dit ayant été retiré) (2). On obtient une petite flamme éclairante en forme de fuseau (3). De même, on peut adapter un brûleur de type « bec Bunsen » sur le robinet de la bouteille de butane (2) et allumer la flamme, la virole étant fermée. On obtient une flamme plus grande mais également éclairante. Dans les deux expériences, le comburant (l'air) n'est pas mélangé au butane et diffuse seulement dans le jet de combustible pour participer à la réaction de combustion. La flamme ainsi obtenue est appelée *flamme de diffusion.* Le mélange réactionnel réalisé par diffusion spontanée contient un défaut d'air par rapport à la stoechiométrie, de sorte qu'il se forme des particules de carbone par dissociation du butane. Ce sont ces particules de carbone, portées à incandescence par la chaleur de la combustion, qui lui donnent sa couleur jaune.

Second cas :

Ouvrons progressivement la virole du bec Bunsen (4).

L'allure de la flamme se modifie. La pointe jaune diminue et disparaît même complètement si l'ouverture de la virole est suffisamment grande. Simultanément apparaît à l'orifice du brû-

---

(2) Les exemples donnés ci-après correspondent à des expériences réalisables avec une bouteille de butane de type « Camping-gaz » à un seul brûleur équipé d'un robinet. Le brûleur en forme de champignon, percé de trous est emmanché sur la pièce constituant le robinet, qui est percée d'une base de tout petit diamètre (0,2 à 0,3 mm). Les expériences pourront être faites soit en l'absence de brûleur, soit en ayant remplacé le brûleur usuel par un brûleur de type « bec Bunsen » adapté spécialement au robinet de la bouteille et équipé d'une virole pour permettre au gaz de se mélanger à de l'air dans le tube du brûleur.

(3) Veiller à ouvrir *très peu* le robinet et à allumer le butane immédiatement. Refermer le robinet sans attendre si la flamme est soufflée.

(4) Si la flamme se souffle, la rallumer après avoir diminué l'ouverture du robinet.

leur un cône bleu appelé *dard* et surmonté d'un *panache*. Nous avons obtenu une flamme *d'un mélange* de gaz (combustible + comburant). Dans le dard se déroulent les réactions primaires de combustion alors que le panache est une zone de diffusion où les produits primaires de combustion, notamment l'oxyde de carbone, achèvent de brûler à l'air.

Ces expériences nous permettent de nous poser la question : qu'*est-ce qu'une flamme ?* Ainsi, une flamme apparaît comme *une région de l'espace de faible épaisseur qui sépare le gaz* butane (1er cas) *ou le mélange* butane + air (2me cas) *non encore brûlé des produits de combustion et qui est le siège de réactions fortement exothermiques.* Elle est caractérisée par un *gradient thermique important* et par une *émission lumineuse,* due au fait que la chaleur de réaction se transmet aux atomes, radicaux et molécules présents et excite dans une certaine mesure leur spectre d'émission caractéristique.

L'intérieur du dard (comme l'intérieur du fuseau de la toute première expérience) est constitué de mélange (ou de gaz) froid, ce que l'on peut mettre en évidence à l'aide d'un bâtonnet de verre.

Au passage, considérons un élément de surface s du dard. La *vitesse de propagation de la flamme* ou vitesse de flamme caractérise la tendance de cet élément de surface à se déplacer en direction du mélange gazeux à brûler. Nous pouvons le représenter comme un vecteur $\vec{v}_f$ perpendiculaire à l'élément de surface considéré. En fait, nous avons affaire à un système dynamique (écoulement permanent du mélange gazeux) qui est stable. Par quoi est-il équilibré ? Par la vitesse d'écoulement du mélange gazeux que nous pouvons représenter comme un vecteur $\vec{v}_e$ perpendiculaire et de sens opposé au précédent.

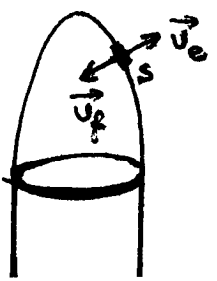

Fig. 1

L'ensemble des éléments de surface tels que s constitue le *front de flamme.* Dans le cas présent, la dynamique des fluides

permet d'expliquer aisément sa forme de paraboloïde de révolution.

Si l'on diminue la vitesse du mélange de gaz (en diminuant le débit de butane) $v_e < v_f$. De la sorte, la flamme va avoir tendance à entrer dans le bec Bunsen et à se fixer sur la buse sous forme d'une flamme de diffusion.

Si, au contraire, on augmente fortement la vitesse d'écoulement du mélange gazeux $v_e > v_f$, la flamme tend à se décoller de l'orifice du bec et à se souffler.

Du point de vue mécanique, pour que l'on obtienne une flamme stable, il faut donc que la vitesse d'écoulement du combustible ou du mélange qui le contient équilibre la vitesse de famme. *Du point de vue chimique* aussi, il y a certaines conditions à remplir, car un mélange gazeux contenant un combustible ne brûle en général qu'entre deux limites de composition dites *limites d'explosivité,* définies pour une température donnée.

Cela correspond au fait que, pour que la combustion se propage d'un élément de volume du mélange gazeux à un autre, le premier élément de volume qui brûle doit dégager suffisamment d'énergie pour allumer l'autre, et ainsi de suite. Ceci n'est possible qu'entre des limites plus ou moins larges selon les combustibles, qui englobent la composition correspondant à la réaction globale stoechiométrique. Ces limites ne peuvent pas être calculées : elles sont le résultat de l'expérience. Ainsi, un mélange méthane + oxygène à la température ambiante ne brûle pas s'il contient moins de 5,15 % CH_4 ou plus de 60,5 % CH_4. Ces deux limites, toujours exprimées par la teneur en combustible dans le mélange gazeux, portent respectivement les noms de *limite inférieure* et de *limite supérieure* d'explosivité.

En présence d'un diluant (azote par exemple), ces limites sont modifiées. Ainsi, dans l'air et en fonction de la température, elles sont données dans le tableau II. On constate qu'une élévation de température élargit le domaine d'explosivité. Ceci est logique puisque l'élévation de température correspond à un apport d'énergie supplémentaire qui vient s'ajouter à celui provenant de la combustion du mélange du combustible et du comburant.

TABLEAU II

Evolution des limites d'explosivité du mélange méthane-air avec la température

Température °C	Limite inférieure %	Limite supérieure %
0	5,2	13,4
100	4,7	13,7
200	4,2	14,7
300	3,7	15,9
400	3,1	17,3

Notons sans plus attendre qu'une condition de sécurité impose que *l'étude* de ces mélanges de gaz s'effectue non en statique, dans une enceinte close, mais *en dynamique,* sur un mélange en circulation dans un tube, avec inflammation du mélange *au fur et à mesure* qu'il apparaît, donc *sans accumulation.* S'il y a accumulation, dès que la réaction s'amorce, elle se propage rapidement dans tout le mélange et cela donne une *explosion.* L'exemple typique est celui d'une ménagère qui cherche à allumer le four de sa cuisinière à gaz. Si elle laisse filer le gaz avant qu'elle ait réussi à l'allumer, très vite elle atteint dans le four un mélange de gaz et d'air de composition comprise à l'intérieur des limites d'explosivité et quand elle parvient à allumer le mélange, tout le volume contenu dans le four flambe en même temps constituant une explosion et elle se fait brûler.

Mais ce n'est pas toujours facile d'équilibrer la vitesse de flamme par la vitesse d'écoulement des mélanges gazeux, car la vitesse de flamme dépend de la composition des mélanges (ainsi que de la température et de la pression) et, pour certains mélanges, ces vitesses sont élevées (tableau III).

TABLEAU III

Vitesse de quelques flammes à température et pression normales

Combustible	Comburant	
	air	oxygène
méthane	0,38 m/s	3,2 m/s
autres hydrocarbures aliphatiques	même ordre de grandeur	—
éthylène	0,7	—
oxyde de carbone	0,45	1,0
hydrogène	2,5	8,9
acétylène	1,5	8,0

Ainsi, si l'on ne prend pas de précaution particulière pour arrêter la combustion de ces mélanges, par exemple si l'on se contente de fermer l'arrivée d'un des gaz, la vitesse d'écoulement se trouve ralentie et le front de flamme se propage à la rencontre du mélange, à l'intérieur de l'installation qui, de ce fait, peut être détruite (5).

En spectrométrie de flamme où il existe des brûleurs de deux types (avec ou sans chambre de mélange), les constructeurs d'appareils ont renoncé à utiliser des brûleurs avec chambre de

(5) Pour éviter cet accident, il est préférable de souffler la flamme en forçant le débit de l'un des constituants du mélange (le comburant de préférence) et de fermer ensuite les arrivées des deux gaz.

mélange dans les cas des flammes $H_2 - O_2$ et $C_2H_2 - O_2$. Ceci est toutefois possible avec une flamme $C_2H_2 - N_2O$ du fait de sa vitesse de flamme plus faible que pour le mélange $C_2H_2 - O_2$.

C'est aussi pour une raison de sécurité que les gaz mis en bouteille ou en réservoir ou distribués dans un réseau ont une composition plus riche que la limite supérieure d'explosivité. S'il y a une fuite de gaz, elle peut toujours provoquer une flamme ou une explosion en dehors de la bouteille, du réservoir ou de la conduite mais (sauf accident secondaire), la combustion involontaire du gaz s'arrêtera au niveau de la fuite et ne se propagera pas à l'intérieur du réservoir ou de la canalisation de distribution, puisque le gaz y est trop riche pour brûler.

Supposons un mélange gazeux inflammable réalisé, par exemple un mélange équimoléculaire de propane et d'oxygène. Sa composition est comprise à l'intérieur des limites d'explosivité. En l'absence de tout apport d'énergie, il ne s'enflamme pas. L'inflammation n'intervient qu'au-dessus d'une certaine température appelée *température d'auto-inflammation* qui dépend de la pression. A la pression atmosphérique, cette température est voisine de 260°C (fig. 2).

En règle générale, la température d'auto-inflammation dépend de la composition du mélange. Dans les cas courants de mélanges de composés organiques et d'air, elle est de l'ordre de 200 à 600°C.

Quand la pression varie (voir fig. 2), on peut observer des « flammes froides », très peu lumineuses, avec des températures d'inflammation voisines de 300 à 400°C. Ce phénomène correspond à des réactions différentes de celles des combustions normales, réactions mettant en œuvre la formation intermédiaire et la dissociation de peroxydes facilement explosifs.

Enfin, il apparaît généralement dans un petit domaine de pressions, une zone dans laquelle on observe trois températures limites (T_1, T_2, T_3). Cette zone montre une possibilité d'inflammation du mélange considéré à des températures très modérées (entre T_1 et T_2), auxquelles on peut ne pas s'attendre à avoir une flamme.

Aux températures supérieures à la température d'auto-inflammation, l'allumage d'un mélange inflammable nécessite un certain temps, d'autant plus court que la température et la pression sont plus élevées. On l'appelle *temps d'induction* ou *délai d'auto-inflammation.* La fig. 2 donne une idée de son importance. Du point de vue cinétique, il correspond au délai nécessaire à la formation des individualités chimiques (H, OH) responsables de l'initiation des réactions en chaînes.

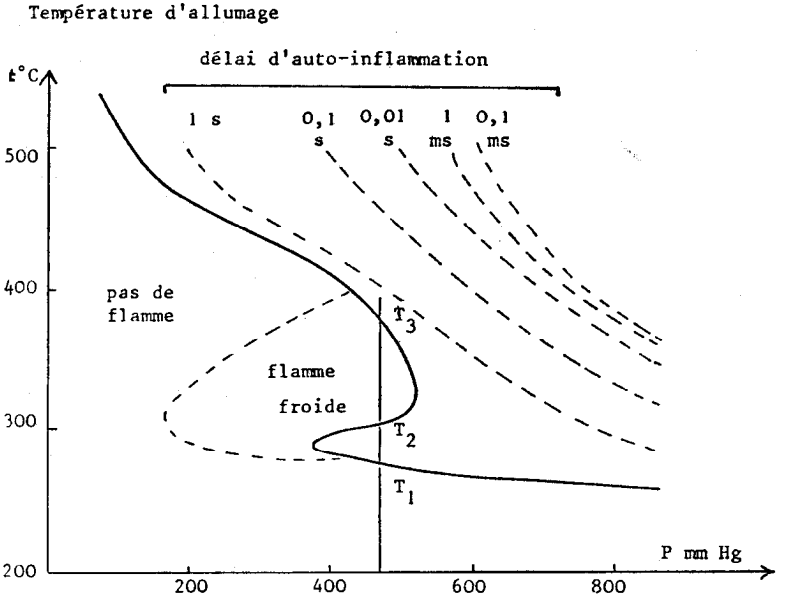

Fig. 2. — Diagramme d'auto-inflammation d'un mélange équimoléculaire propane + oxygène.

Il ne faut pas confondre la température d'auto-inflammation qui est donc la température au-dessus de laquelle le mélange gazeux considéré peut s'enflammer spontanément, et la *température de la flamme qui en résulte.* Cette dernière est de l'ordre de 2 000°C pour des flammes d'hydrocarbure ou d'hydrogène et d'air, et elle avoisine 3 000 ° pour des flammes des mêmes combustibles dans l'oxygène.

L'ensemble des notions relatives à l'auto-inflammation a trouvé une application industrielle remarquable dans la fabrication de l'acétylène à partir du méthane par le procédé SACHSSE. Dans ce procédé, on réalise une combustion partielle du méthane à l'oxygène, le rapport O_2/CH_4 étant de 0,5 à 0,6 (alors qu'il devrait être de 2 pour la réaction stoechiométrique - voir tableau I). La combustion d'une partie du méthane apporte la chaleur nécessaire à la conversion du reste du méthane suivant la réaction endothermique globale :

$$2\ CH_4 \rightleftarrows C_2H_2 + 3\ H_2$$

qui nécessite une température de 1 200 à 1 500°C. Pour réaliser cette température, il faut préchauffer séparément le méthane et l'oxygène à 600° puis les mélanger à cette température qui est

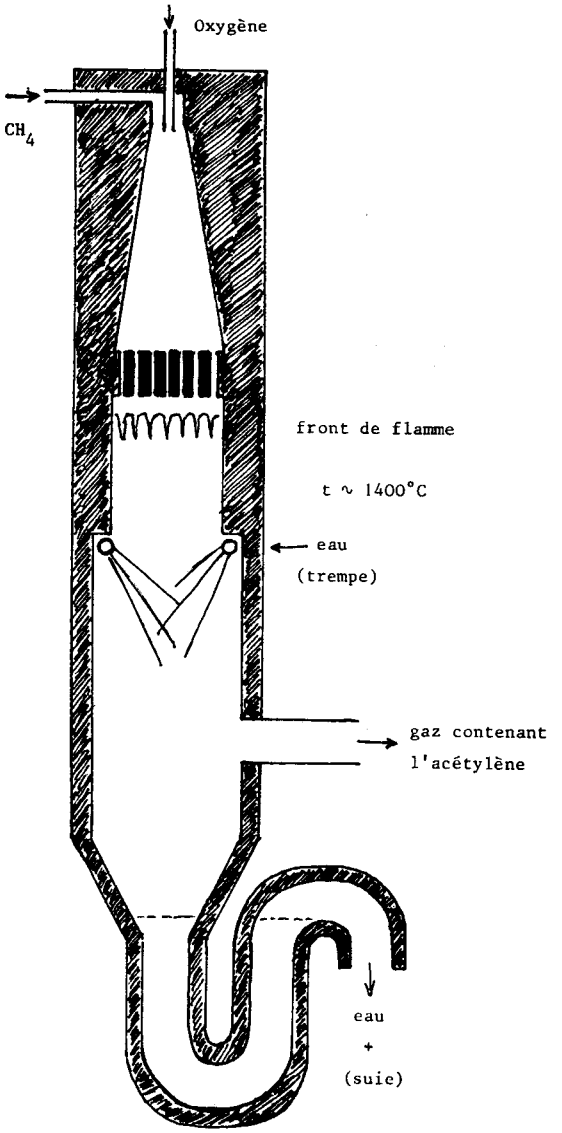

Fig. 3. — Fabrication de l'acétylène par le procédé SACHSSE.

voisine de la température d'auto-inflammation. La composition du mélange, à cette température toujours, est à l'intérieur des limites d'explosivité (proche de la limite supérieure). Le délai d'auto-inflammation serait supérieur à la seconde. Le fonctionnement correct du réacteur, qui est en fait un énorme brûleur industriel métallique (fig. 3) et traite 8 000 m^3 CH_4 par heure, repose sur la rapidité des différents processus. Il comprend une chambre de mélange et une chambre de combustion séparées par des canaux étroits constituant un ensemble analogue à une grille de bec Meker. Le mélange est réalisé en 0,1 s (temps inférieur au délai d'auto-inflammation) et la vitesse d'écoulement du mélange dans les canaux est de 9 m/s, vitesse supérieure à celle de propagation de la flamme méthane-oxygène. Dans ces conditions, aucune flamme ne peut prendre naissance. Quand, enfin, le mélange arrive dans la chambre de combustion qui offre un plus grand volume et permet une vitesse d'écoulement plus faible, une flamme stable prend naissance et permet la réalisation des réactions souhaitées. Un refroidissement brutal du milieu réactionnel, ou trempe, permet d'arrêter la réaction industrielle et de récupérer les produits.

LA COMBUSTION DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

La combustion des solides et des liquides se rapporte en partie à celle des gaz.

Un solide brûle principalement par l'intermédiaire des *matières volatiles* qu'il émet et en partie par *ignition* (observer la combustion d'une bûche de bois). Les cinétiques des deux phénomènes sont très différentes. L'ignition est due à l'oxydation de la phase solide proprement dite : c'est une réaction lente en raison de l'inertie chimique des solides en général. Elle s'accompagne de l'incandescence du solide en cours de réaction, qui se trouve porté à haute température et émet un rayonnement.

Un liquide ne brûle pas par lui-même. C'est sa vapeur qui brûle lorsqu'elle forme avec le comburant (air ambiant) un mélange inflammable. La notion de limites d'explosivité s'applique donc aussi aux vapeurs émises par des liquides (voir tableau IV). Il suffit généralement de faibles concentrations de vapeurs pour réaliser des mélanges explosifs : dans beaucoup de cas, la limite inférieure d'explosivité est de l'ordre de 1 % dans l'air.

Suivant la température à laquelle un liquide se trouve porté, quatre cas sont à considérer : un liquide froid peut rester inerte même au contact d'une flamme. Au-dessus d'une certaine température t_1 appelée *point d'éclair*, il émet des vapeurs en quantité suffisante pour s'enflammer au contact d'une flamme, mais la combustion s'arrête aussitôt et ne peut donc s'entretenir : la vitesse de production de la vapeur est inférieure à sa vitesse de

TABLEAU IV

Limites d'explosivité dans l'air de quelques corps purs (température ambiante)

	L_{inf} %	L_{sup} %
1. Composés les plus dangereux car instables, susceptibles de se décomposer même en l'absence d'air :		
acétylène	1,7	82 (100)
hydrazine	4,7	100
oxyde d'éthylène	3	100
vinylacétylène	2	100
2. Corps présentant un grand domaine d'explosivité :		
hydrogène (H_2S)	4	75,6
acide sulfhydrique (H_2S)	4,3	45,5
sulfure de carbone (CS_2)	1	60
oxysulfure de carbone (COS)	11,9	29
éthylène	2,7	34
éther ($C_2H_5 - O - C_2H_5$)	1,7	36
nitrite deéthyle (C_2H_5O NO)	3	50
formaldéhyde (HCHO)	7	73
acétaldéhyde ($CH_3 - CHO$)	4	57
acide cyanhydrique (HCN)	5,4	46,6
cyanogène $(CN)_2$	6	43
3. Corps présentant un domaine d'explosivité modéré :		
en général	0,6 à 4	8 à 20

combustion. Le point d'éclair des combustibles liquides est une caractéristique importante de ces produits qui fait l'objet d'essais normalisés (en vase ouvert ou fermé). Elle permet de déceler la présence de matières volatiles facilement inflammables, mieux que par un essai de distillation, dans le cas d'un mélange liquide.

Si l'on continue à chauffer le liquide, on peut atteindre une température t_2 ou *point d'inflammation* à partir de laquelle les vapeurs émises peuvent être enflammées au contact d'une flamme et sont en quantités suffisantes pour que la combustion s'entretienne d'elle-même. Naturellement, les liquides qui présentent le plus grand risque d'inflammation sont les liquides volatils (de faible masse molaire) tels CS_2, l'acétone, l'éther, etc. Enfin, on peut atteindre une température t_3 ($> t_2 > t_1$) ou *point d'auto-inflammation* au-dessus de laquelle les vapeurs émises s'enflamment spontanément sous l'action de la chaleur, *sans* contact avec une flamme. Ce point d'auto-inflammation varie beaucoup

d'un composé à un autre, de 140° C pour l'acétaldéhyde à environ 600° C.

Les combustions de solides ou de liquides s'effectuent à leur surface, là où se dégagent les vapeurs et où le comburant peut accéder. La vitesse de combustion est alors contrôlée par les propriétés d'interface (état de division), la température (vaporisation du combustible) et la vitesse de diffusion. Si l'on veut accélérer la combustion (haute productivité de chaleur), il est nécessaire de diviser le combustible (charbon pulvérisé, brûleur à mazout) et de favoriser la diffusion (régime turbulent).

Chaque particule de combustible divisé forme une petite flamme de diffusion. Les très petites particules (gouttelettes ou poussières d'un diamètre voisin de 5 μm) se vaporisent avant de brûler et, dans ce cas, les mélanges avec un comburant se comportent comme des mélanges de gaz et peuvent donner lieu à des explosions s'il y a accumulation (coup de poussier dans les mines)

LES RISQUES INCENDIE ET EXPLOSION ET LA SECURITE.

La flamme, telle que nous l'avons considérée jusqu'à présent constitue quelque chose de bien maîtrisé. Il peut arriver qu'elle échappe au contrôle humain et que cela conduise à une explosion, un incendie, ou les deux successivement ou simultanément (voir encadré : quelques définitions). Il faut essayer de prévenir ces risques et, si un accident se produit, d'intervenir le plus vite et le plus efficacement possible. Certaines personnes (pompiers, ingénieurs et équipes de sécurité dans les établissements industriels importants) sont spécialisées pour cela et on a trop tendance à se reposer sur elles. Car en fait, la sécurité est l'affaire de *tous* et à tous les niveaux : chacun devrait y être sensibilisé et être encouragé à respecter certaines règles qui sont en fait des règles de bon sens mais que l'on devrait suivre de façon quasi-automatique, le jour où il y a un accident, car les choses vont trop vite alors pour avoir le temps de penser à tout ou de découvrir des gestes élémentaires.

LA PREVENTION DES RISQUES INCENDIE - EXPLOSION.

La prévention cherche d'abord à déterminer les risques potentiels d'incendie et d'explosion et à tracer une « *carte des risques* ». Ceci implique la connaissance des caractéristiques physico-chimiques des corps mis en œuvre sans oublier leurs incompatibilités chimiques — et celles des processus réactionnels utilisés. La rédaction et l'affichage de « *consignes de Sécurité* » indiquant la conduite à tenir en cas d'accident relèvent également de la prévention et méritent d'être faits même dans une

salle de classe où des expériences peuvent avoir lieu et à plus forte raison dans une salle de Travaux Pratiques.

La prévention met aussi en œuvre les moyens d'éviter la formation de mélanges inflammables non contrôlés, de supprimer les causes d'inflammation et de s'opposer à la propagation éventuelle du feu. Elle fait appel à l'ensemble de la formation notamment chimique, des individus.

Parmi les *moyens d'éviter la formation de mélanges inflammables,* on peut citer la limitation des quantités de produits inflammables stockés, la ventilation des locaux où ces produits sont entreposés, le bon état et la bonne fermeture des récipients qui les contiennent (veiller à ce qu'ils soient fermés et que la fermeture soit étanche).

Quelques définitions :

Incendie : « Combustion vive que l'on ne maîtrise plus et qui se développe dans l'espace et dans le temps ».

Explosion : « Manifestation subite et violente de la pression ou de la dépression de gaz ou de vapeurs, que ceux-ci aient existé avant cette action ou que leur formation lui ait été concomitante ».

Dans les phénomènes de DÉFLAGRATION, la pression engendrée est de l'ordre du bar, dans ceux de DÉTONATION de 5 à 30 bars.

Prévention : « Ensemble des recherches, de l'expérimentation et du contrôle des moyens, mesures et méthodes qui permettent de s'opposer à la naissance et à la propagation de l'incendie ou de l'explosion ».

Protection : « Ensemble des méthodes destinées à déceler à temps l'incendie ou l'explosion et à les stopper immédiatement ou le plus rapidement possible par des moyens appropriés ».

Parmi les *moyens de supprimer les causes d'inflammation* figure le contrôle de la température, la mise à la terre des matériels et l'emploi de matériels électriques adaptés (antidéflagrants). Naturellement, aussi, il doit être interdit de fumer. Noter que la zone de combusion d'une cigarette est « au rouge », c'est-à-dire à une température voisine de 600°C.

Enfin, *pour s'opposer à la propagation du feu,* s'il vient à se produire, il importe de diviser les risques : ne pas regrouper

tous les produits inflammables dans un même laboratoire, éviter d'en stocker dans le local où ont lieu des manipulations, répartir les stocks dans plusieurs locaux aérés réservés à cet effet, s'assurer que le feu ne peut pas se transmettre facilement d'un local à l'autre (par des caniveaux ou des gaines d'aération ou de passage de câbles électriques). Encloisonner les locaux (couloirs fermés par des portes coupe-feu), vérifier le caractère incombustible des matériaux utilisés (cloisons, rideaux) et, s'il y a lieu, ignifuger les matériaux combustibles.

LA LUTTE CONTRE UNE EXPLOSION.

Dans des établissements spécialisés (usines chimiques, poudreries), équipés de moyens appropriés, on peut envisager de lutter contre une explosion dans une enceinte définie car la rapidité de ce phénomène nécessite l'emploi de dispositifs de détection et de réaction efficaces en des temps de l'ordre du *millième* de seconde (inhibiteurs à base de poudres de $NaHCO_3$ ou $KHCO_3$ ou de composés halogénés tels que C Cl_2F Br).

En dehors d'une action instantanée de ce genre, on ne peut guère que *limiter les effets* dus à une explosion, sur les matériels (l'enceinte considérée et les canalisations annexes) à l'aide de dispositifs mobiles (clapets d'explosion ou soupapes de sécurité) ou fixes (disques d'éclatement ou joints d'explosion) et sur les bâtiments (panneaux et toitures soufflables). A l'extérieur des bâtiments, ces dispositifs sont complétés par des buttes en terre qui les isolent.

Ceci montre qu'en général l'étude et la démonstration de milieux explosifs n'est pas de la vocation des établissements d'enseignement sauf si certains laboratoires de recherche peuvent disposer de *tous* les moyens de lutte nécessaires.

LA LUTTE CONTRE UN INCENDIE.

Avant de devenir un incendie, une combustion non contrôlée débute généralement à échelle réduite. C'est à ce stade qu'il faut essayer de l'arrêter avec la promptitude maximale. Un seau d'eau ou de sable ou une couverture en laine peuvent suffire.

Si on lui laisse prendre de l'ampleur, il faut déployer des moyens plus importants.

Par ailleurs, il est nécessaire de prendre certaines précautions pour se protéger (yeux, voies respiratoires, peau) car, outre la combustion il y a, dans un incendie, dégagement de gaz toxiques et éventuellement corrosifs (CO, CO_2, phosgène : $COCl_2$, HCl, etc.) et risque d'électrocution par suite de la présence d'eau sur des conducteurs électriques.

PRINCIPES DE LUTTE CONTRE UN INCENDIE.

1° **Sauver les personnes** qui peuvent être blessées ou en danger, et soigner et évacuer les blessés dans la mesure où on ne risque pas, en les déplaçant, de faire plus de mal que de bien (dans l'attente de l'arrivée de personnes spécialisées : médecin, ambulancier, etc.).

2° **Lutter sur le foyer par tous les moyens possibles :**

— action sur le combustible :

suppression (fermeture de la vanne d'arrivée - vidange intégrale),

isolement (parois, tranchées coupe-feu),

refroidissement :

— par effet de souffle sur de petits foyers,

— par vaporisation d'un liquide extincteur,

étouffement (par exemple pour les feux de métaux, par action d'un agent de transfert de combustion),

— action sur le comburant :

étouffement, surtout au début : obturation des entrées d'air, projection de sable, terre, mousse (extincteur),

modification d'ambiance : création d'une atmosphère inerte (par N_2, CO_2 ou H_2O) ou soufflage d'air pour diluer le milieu et franchir la limite inférieure d'inflammabilité,

— action sur la réaction de combustion : blocage du mécanisme de la réaction en chaînes :

blocage de radicaux (initiation et propagation) *OH* (par KOH) ou NaOH provenant de $K HCO_3$ ou $NaHCO_3$) ou *H* (par Br provenant d'un composé extincteur bromé),

blocage de la propagation : radical organique (par Cl ou Br provenant d'un composé extincteur),

addition d'un tiers corps (solide ou non) permettant les recombinaisons telles que $R + H \xrightarrow[(+ x)]{} RH$.

3° **Simultanément, éviter que la combustion s'amorce** où elle n'a pas eu lieu et **empêcher la propagation du feu.**

Les modes de propagation du feu peuvent être :

— soit des modes particuliers tels que :

— projection de produits enflammés ou incandescents (peut être l'effet d'une explosion),

— convexion de matières volatiles inflammables,

— inflammation d'herbes, broussailles, déchets, etc.,

— soit les modes bien connus de transfert de la chaleur :

— par conduction : transfert possible d'un local à un autre par échauffement des cloisons,

— par convexion : permet la transmission de la chaleur par les gaz chauds et par les flammes et est responsable de la propagation du feu dans les sens vertical et horizontal, souvent à forte distance. C'est le mécanisme le plus dangereux, à l'origine de la généralisation des incendies et des embrasements. Ces mouvements de convexion provoquent des appels d'air qui, dans des cas extrêmes, ont fait parler de « tempêtes de feu »,

— par rayonnement : responsable de la propagation du feu sur des distances courtes, il n'intervient généralement pas en début de sinistre mais seulement quand le foyer atteint une certaine importance.

ORGANISATION DE CETTE LUTTE.

La lutte contre un incendie met en jeu, s'il y a lieu, *plusieurs niveaux d'intervention* et fait l'objet de *consignes de sécurité*, qui fixent les rôles des différents intervenants possibles :

— 1er niveau : niveau local : laboratoire, bâtiment, atelier.

— 2me niveau : niveau de l'établissement, en supposant que celui-ci dispose d'un service spécial ou de services généraux. A ce niveau doit être mis en place un réseau de surveillance, détection, alarme et alerte et, en cas de besoin, l'organisation de l'évacuation et du sauvetage du personnel.

— 3me niveau : niveau général : lutte selon un plan préparé à l'avance avec l'aide du corps des sapeurs-pompiers appelés à intervenir.

Cette organisation est celle en vigueur dans l'industrie, en particulier dans l'industrie chimique. Il est à craindre que nos établissements d'enseignement ne soient pas pleinement en mesure de jouer le rôle qui devrait être le leur au second niveau d'intervention. Heureusement, en règle générale, les risques incendie et explosion liés à l'enseignement sont suffisamment faibles pour qu'on puisse espérer n'avoir à intervenir qu'au premier niveau.

MOYENS DE LUTTE.

Les moyens de lutte dépendent des niveaux d'intervention auxquels ils sont associés : nous ne mentionnerons que ceux des deux premiers. Il faut noter qu'ils doivent être adaptés au type de feu à combattre. Ceux-ci se répartissent en quatre classes (voir norme NF.S 60-100).

— *Classe A :* feux dits « secs » (matériaux à base de cellulose : bois, tissus, papiers, etc.),
combustion vive avec flamme ou combustion lente sans flamme, mais avec formation de braises incandescentes,
— *Classe B :* feux dits « gras » (solides et liquides type hydrocarbures, alcools, cétones, solvants divers),
— *Classe C :* feux de gaz,
— *Classe D et Hors classification :* feux de métaux, matières plastiques (nylon), certains produits chimiques.

Il existe de plus des possibilités d'aggravation, provenant par exemple de la présence d'un conducteur électrique sous tension ou de la nature mal adaptée de l'agent extincteur utilisé.

Au premier niveau d'intervention correspondent *les matériels dits de première intervention.* Ceux-ci comprennent les *extincteurs,* les *robinets d'incendie armés* (R.I.A. de diamètres 20 et 40 mm), les *colonnes sèches* (diamètre 70 et 100 mm) alimentées le moment venu par motopompe ou par un réseau surpressé et les *installations fixes d'extinction et d'inhibition d'ambiance,* à déclenchement automatique (par sprinkler) et à main.

Les extincteurs méritent une attention particulière (voir norme NF. S 61-901 à 920). Ils se distinguent principalement par la *nature* de l'agent extincteur qu'ils contiennent, qui doit être adaptée au type de feu (voir tableau V) et par la pression intérieure ou la pression « de chasse » et leur mode de vidange.

Ils sont dits *à pression permanente* s'ils sont remplis sous pression d'un gaz ou contiennent un agent extincteur ayant une tension de vapeur supérieure à la pression atmosphérique. Ils sont *à pression auxiliaire* si celle-ci est obtenue au moment de l'emploi par le bris d'une ampoule de CO_2. Ils sont *autogénérateurs de pression* si le mélange de réactifs au moment de l'emploi produit une réaction chimique telle que :

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\ NaHCO_3 \xrightarrow[+\ (\text{émulsifiant})]{} 3\ Na_2SO_4 \ldots$$
$$\ldots + 2\ Al(OH)_3 + 6\ CO_2\ (+\ \text{mousse})$$

ou :

$$H_2SO_4 + 2\ Na\ H\ CO_3 \xrightarrow[(+\ \text{idem})]{} Na_2SO_4 \ldots$$
$$\ldots + H_2O + 2\ CO_2\ (+\ \text{mousse})$$

La vidange peut se faire « à débit contrôlé », ce qui signifie qu'elle peut être arrêtée à l'aide d'un robinet. Elle est dite « intégrale » si on ne peut pas l'arrêter.

TABLEAU V

	modes d'action					emploi selon les classes de feu				aggravation
Agents extincteurs	refroidt	étoufft	effet de souffle	inhibition d'ambiance	dispersion	A	B	C	hors classif.	risque électrique
mousses	+	+				+	+			
liquide ignifuge	+	+				+				
eau (additif) jet plein	+	+			+	+				
eau (idem) jet pulvérisé	+	+	sous hte pression			+	+			+ sans additif
eau (légère) (**)	+	+				+	+			
poudres			+	+			+	+	+	+
anh. carbonique	+		+				+		+	+
halogénés (*)	+		+	+			+	+	+	+

(*) Ventiler les locaux au cas où on les emploie (risque de formation de phosgène : $COCl_2$: gaz « de combat »).
(**) Solution d'un agent tensio-actif à fort pouvoir moussant.

CONCLUSION.

Malgré sa longueur, cet exposé est loin d'avoir été exhaustif sur les flammes dont beaucoup d'aspects (températures de flamme, aspects mécaniques, distinction entre déflagration et détonation, applications comme sources de chauffage ou comme sources de radiations ou comme moyens de propulsion, etc.) sont restés, si je puis dire, dans l'ombre. J'ai voulu centrer mon sujet principalement sur les connaissances élémentaires permettant d'aborder logiquement les notions de sécurité correspondantes.

Le risque incendie et explosion n'est pas le seul aspect du risque chimique. Il y en aurait deux autres également importants à prendre en considération : la toxicité des produits chimiques et leur caractère agressif (leur causticité).

Le risque chimique n'est pas non plus le seul risque que l'on rencontre dans la vie quotidienne ni dans nos établissements, ni dans l'industrie. Il ne faut pas négliger les risques mécaniques (machines tournantes, chocs, chutes d'objets), les risques électriques, les risques liés aux manutentions, déplacements, transports, etc.

Notre pays s'étant trouvé sensibilisé par quelques incendies spectaculaires ces dernières années, on se préoccupe davantage maintenant de sécurité en général et elle commence même à pénétrer dans les établissements d'enseignement. Le problème est de savoir comment il faut présenter ces notions à nos élèves : en particulier, faut-il faire des cours spéciaux sur la sécurité ou au contraire attirer l'attention sur l'aspect sécurité dans le cadre d'un cours plus général ?

Il semble que la seconde solution soit préférable d'une part parce qu'elle associe directement un enseignement de base à une application concrète, d'autre part et surtout dans l'enseignement secondaire, parce qu'elle est mieux capable que toute autre de s'adapter directement au niveau des connaissances des élèves.

De même, pour la formation des Ingénieurs, c'est une *formation à l'hygiène et à la sécurité, intégrée* à la formation fondamentale, que préconise la Commission des Titres d'Ingénieur.

J. ROBIN,
(*I.N.S.A. - Lyon*).

QUELQUES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

B. LEWIS et G. von ELBE. — *Combustion, flames and explosions of gases.* 2e éd. Academic Press (New York et Londres 1961).

A.-G. GAYDON et H.-G. WOLFHARD. — *Flames, their structure, radiation and temperature.* 2e edition. Chapman et Hall (Londres 1960).

H.-F. COWARD et G.-W. JONES. — *Limits of flammability of gases and vapors.* Bulletin 503 - Bureau of Mines (U.S. Government printing office - Washington 1952).

R. HERRMANN et C.-Th.-J. ALKEMADE. — *Flammen photometrie.* 2e ed. Springer Verlag (Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960).

E. PUNGOR. — *Flame Photometry Theory.* Van Nostrand (Londres et Akademiai kiado Budapest 1967).

Brochures techniques documentaires : BT 104 *Combustibles gazeux et principes de la combustion.* Gaz de France (1972).

G. DE SOETE et A. FEUGIER. — *Aspects physiques et chimiques de la combustion.* Edit. Technip. (Paris 1976).

Publications de l'I.N.R.S. (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, 9, avenue Montaigne, 75008 Paris).

A. VALLAUD et R. DAMEL. — *Hygiène et Sécurité dans la grande industrie chimique minérale* (1966) *organique* (1971).

N° 310 (1969) *Prévention et lutte contre le feu.*

N° 335 (1969) *Les mélanges explosifs.*