

Rédacteur
Casey C. Grant

41

Table des matières

Notions de base	<i>Dougal Drysdale</i>	41.2
Les causes d'incendie	<i>Tamás Bánky</i>	41.9
Les mesures de prévention contre l'incendie	<i>Peter F. Johnson</i>	41.15
La protection passive contre l'incendie.	<i>Yngve Anderberg</i>	41.20
La protection active contre l'incendie.	<i>Gary Taylor</i>	41.23
L'organisation de la protection contre l'incendie	<i>S.K. Dheri</i>	41.26

● NOTIONS DE BASE

Dougal Drysdale

Les caractéristiques physico-chimiques du feu

Le feu est la manifestation d'une combustion non maîtrisée. Il implique les matières combustibles des bâtiments où nous vivons, travaillons et passons nos loisirs, ainsi que toute une série de gaz, liquides et solides, utilisés dans l'industrie et le commerce. Ces matières sont généralement à base de carbone, et nous nous y référerons dans le présent article sous le terme générique de *combustibles*. Malgré les importantes différences chimiques et physiques qui les distinguent lorsqu'ils brûlent, ces combustibles ont certaines caractéristiques qui leur sont communes. Leurs différences résident dans la facilité avec laquelle ils prennent feu (*inflammation* ou *allumage*), la vitesse à laquelle le feu se développe (*propagation de la flamme*) et l'énergie que leur combustion peut dégager par unité de temps (*débit calorifique*). A mesure que nous en apprenons davantage sur le feu et la combustion, nous sommes mieux en mesure de quantifier et de prévoir le comportement au feu des matériaux et d'appliquer nos connaissances au domaine général de la sécurité en cas d'incendie. Nous nous proposons, dans le présent article, d'examiner certains des principes qui sont à la base des phénomènes liés au feu, dans le but de pouvoir mieux les appréhender.

Notions de base

Les matières combustibles se trouvent partout autour de nous. Si les conditions s'y prêtent, ces matières peuvent prendre feu sous l'effet d'une *source d'inflammation* capable de déclencher une réaction auto-entretenue. Dans ce processus, le «combustible», en se combinant à l'oxygène de l'air, libère de l'énergie (chaleur) et se transforme en produits de combustion dont certains peuvent être nocifs. Il est important de bien comprendre les mécanismes de l'inflammation et de la combustion.

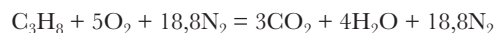
La plupart des incendies prennent naissance dans des solides (bois, produits du bois, polymères synthétiques), même si les combustibles gazeux et liquides ne sont pas rares. Il nous paraît utile, avant d'aborder les notions de base, d'examiner brièvement la combustion des gaz et des liquides.

Les flammes de diffusion et les flammes de prémélange

Un gaz inflammable (comme le propane C_3H_8) peut brûler de deux façons. On peut allumer un courant ou un jet de gaz sortant d'un tube (par exemple, d'un bec Bunsen dont l'arrivée d'air est fermée), qui brûle alors avec une *flamme de diffusion*, c'est-à-dire où la combustion se produit dans les régions où le combustible gazeux et l'air se mélangent par diffusion. Cette flamme émet une lumière jaune caractéristique indiquant la présence de minuscules particules de suie résultant d'une combustion incomplète. Certaines de ces particules brûlent dans la flamme, mais les autres se dégagent de la flamme pour former de la *fumée*.

Si le gaz et l'air sont bien mélangés au préalable, une flamme de prémélange se produira, à condition que le mélange se situe dans l'intervalle des concentrations défini par les *limites inférieure et supérieure d'inflammabilité* (voir tableau 41.1). En dehors de ces limites, le mélange n'est pas inflammable (à noter qu'une *flamme de prémélange* ou *flamme bleue* se stabilise à l'extrémité de la buse d'un bec Bunsen lorsque l'arrivée d'air est ouverte). Si un mélange est inflammable, une petite source d'énergie, comme une étincelle électrique, suffit pour l'enflammer. Le mélange *stoechiométrique* est le plus facile à enflammer parce qu'il contient juste assez d'oxygène pour brûler complètement le combustible et le transformer en gaz carbonique et en eau (voir la réaction dans l'équation ci-après, dans laquelle l'azote est présent dans la même proportion que

dans l'air, mais n'intervient pas dans la combustion). Dans cette réaction, nous avons choisi le propane (C_3H_8) comme combustible:



Une très petite étincelle électrique n'ayant qu'une énergie de 0,3 mJ est suffisante pour enflammer un mélange stoechiométrique propane-air dans la réaction ci-dessus. Il peut s'agir d'une décharge d'électricité statique à peine perceptible, comme celle qui se produit lorsqu'on touche un objet mis à la terre après avoir fait quelques pas sur une moquette synthétique. Des quantités d'énergie plus petites encore suffisent pour enflammer certains gaz particulièrement réactifs, comme l'hydrogène, l'éthylène ou l'acétylène. Dans de l'oxygène pur (comme dans la réaction ci-dessus, mais sans l'effet de dilution de l'azote), des quantités d'énergie encore plus faibles peuvent amorcer la combustion.

La flamme de diffusion associée à un flux de combustible gazeux s'observe également lorsqu'un combustible liquide ou solide est en combustion vive. Dans ce cas toutefois, la flamme est alimentée par les vapeurs de combustible qui se dégagent à la surface du liquide ou du solide. Le débit de ces vapeurs est fonction de leur taux de combustion dans la flamme de diffusion, celle-ci transmettant à la surface l'énergie nécessaire à la production des vapeurs. Il s'agit là d'un simple mécanisme d'évaporation dans le cas des combustibles liquides, mais dans celui des solides, l'énergie transmise à la surface doit être suffisante pour décomposer le combustible, dont les macromolécules se divisent alors en fragments plus petits pouvant se vaporiser et s'échapper de la surface. Ce cycle thermique est indispensable au maintien d'un débit de vapeurs suffisant pour alimenter la flamme de diffusion (voir figure 41.1). Il est possible d'éteindre le feu en agissant sur ce processus par différents moyens (voir ci-après).

Les échanges thermiques

Il est essentiel de comprendre les échanges de chaleur (ou d'énergie) qui se produisent si l'on veut saisir le comportement au feu et les processus qui y sont reliés. Le sujet mérite une étude soignée. Il existe une documentation abondante sur la question (Wélty, Wilson et Wicks, 1976; DiNunno, 1988), mais on se limitera ici à attirer l'attention sur trois mécanismes: la conduction, la convection et le rayonnement. Les équations de base de l'échange thermique (\dot{q}'') à l'équilibre sont:

$$\text{Conduction: } \dot{q}'' = \frac{k}{l}(T_1 - T_2) \quad \text{kW/m}^2$$

$$\text{Convection: } \dot{q}'' = h(T_1 - T_2) \quad \text{kW/m}^2$$

$$\text{Rayonnement: } \dot{q}'' = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad \text{kW/m}^2$$

La conduction intervient dans le transfert de chaleur à travers les solides: k est une propriété physique appelée conductivité thermique (exprimée en kW/mK) et l , la distance (en m) sur laquelle la température thermodynamique passe de T_1 à T_2 (en degrés Kelvin). La convection représente le transfert de chaleur entre un fluide (dans ce cas l'air, les flammes ou les produits de combustion) et une surface (solide ou liquide): h est le coefficient de transmission thermique par convection (exprimé en kW/m²K), qui dépend de la configuration de la surface et de la nature de l'écoulement du fluide le long de cette surface. Le rayonnement, semblable à la lumière visible (sauf qu'il a une plus grande longueur d'onde), se propage sans nécessiter de support matériel (même à travers le vide): ε est l'émissivité de la surface (c'est-à-dire son aptitude à émettre un rayonnement) et σ , la constante de Stefan-Boltzman ($56,7 \times 10^{-12}$ kW/m²K⁴). Le rayonnement thermique se déplace à la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s) et tout objet qu'il rencontre projette une ombre.

La vitesse de combustion et le débit calorifique

Les échanges de chaleur entre les flammes et la surface d'un combustible liquide ou solide se font par convection et par rayonnement, mais ce dernier phénomène domine lorsque le diamètre effectif du feu dépasse 1 m. La vitesse de combustion (\dot{m} , en g/s) peut être exprimée par la formule:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \cdot S_{comb} \quad \text{g/s}$$

\dot{Q}_F'' est le flux thermique de la flamme vers la surface (kW/m²); \dot{Q}_L'' , la perte de chaleur de la surface (par rayonnement et par conduction à travers le solide), exprimée sous forme d'un flux (kW/m²); S_{comb} la superficie du combustible (m²); et L_V , sa chaleur de gazéification (équivalent de la chaleur latente de vaporisation des liquides) en kJ/g. Si un incendie se déclare dans un espace confiné, les gaz fuligineux à haute température qui montent du feu (parce qu'ils sont plus légers que l'air ambiant) sont déviés sous le plafond, réchauffant les surfaces supérieures. Ces surfaces ainsi que la couche de fumée résultante rayonnent alors de la chaleur vers le bas, particulièrement en direction de la surface du combustible, augmentant la vitesse de combustion selon la formule:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_F'' + \dot{Q}_{ext}'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \cdot S_{comb} \quad \text{g/s}$$

où \dot{Q}_{ext}'' est la chaleur supplémentaire rayonnée du plafond vers le bas (kW/m²). Cette rétroaction augmente sans cesse la vitesse de combustion provoquant le phénomène d'embrasement général, qui se produit dans les espaces clos s'il y a assez d'air et de combustible pour entretenir le feu (Drysdale, 1985).

La vitesse de combustion est limitée par L_V , la chaleur de gazéification, dont la valeur est relativement basse dans le cas des liquides et assez élevée dans le cas des solides. C'est la raison pour laquelle les solides tendent à brûler beaucoup plus lentement que les liquides.

Selon certains experts, le *débit calorifique* serait le paramètre qui influe le plus sur le comportement d'un matériau (ou d'un ensemble de matériaux) dans un incendie. Le débit calorifique (DC) est relié au taux de combustion par la formule:

$$DC = \dot{m} \Delta H_C \quad \text{kW}$$

dans laquelle ΔH_C est la chaleur effective de combustion du combustible (kJ/g). De nouvelles techniques permettent maintenant de mesurer le débit calorifique à différentes valeurs du flux thermique (au moyen du calorimètre conique, par exemple). On peut également déterminer le débit calorifique d'articles encombrants, tels que les meubles capitonnés et les revêtements muraux, en mesurant la consommation d'oxygène dans de grands calorimètres (Babrauskas et Grayson, 1992).

Il importe de noter que, lorsqu'un incendie s'étend, non seulement le débit calorifique augmente, mais la formation de «produits de combustion» s'accélère également. Ces derniers contiennent des substances toxiques et nocives ainsi que de la fumée chargée de particules, en quantités qui s'accroissent à mesure que l'oxygène présent devient insuffisant pour assurer une combustion complète.

L'inflammation

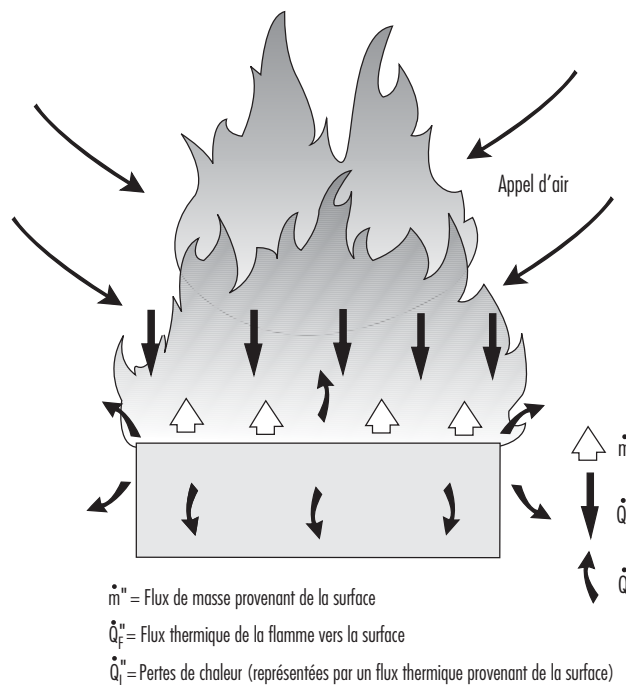
Pour faire brûler un liquide ou un solide, il faut élever sa température de surface jusqu'à ce qu'il produise assez de vapeurs pour entretenir une flamme, une fois que ces vapeurs ont pris feu. Les combustibles liquides peuvent être classés selon leur *point d'éclair*, c'est-à-dire selon la température la plus basse à laquelle il existe en surface un mélange inflammable de vapeurs et d'air (autrement dit, la tension de vapeur correspond à la limite inférieure d'inflammabilité). Le point d'éclair est mesuré à l'aide d'un appareil standard. Quelques valeurs caractéristiques sont présentées au

Tableau 41.1 • Limites inférieure et supérieure d'inflammabilité dans l'air

	Limite inférieure d'inflammabilité (% par volume)	Limite supérieure d'inflammabilité (% par volume)
Acétone	2,6	13
Benzène	1,3	7,9
n-Décane	0,75	5,6
Ethanol	3,3	19
n-Hexane	1,2	7,4
Méthane	5,0	15
Méthanol	6,7	36
Monoxyde de carbone	12,5	74
Propane	2,1	9,5

tableau 41.2. Il faut dépasser légèrement le point d'éclair pour que la quantité de vapeurs émises suffise à l'entretien d'une flamme de diffusion. On atteint ainsi le *point d'inflammation*, également appelé *point de feu*. Dans le cas des combustibles solides, les mêmes principes s'appliquent, mais les températures en cause doivent être assez élevées pour produire une décomposition chimique. Le point d'inflammation est en général supérieur à 300 °C, selon le combustible. Les matériaux ignifuges ont d'ordinaire un point d'inflammation sensiblement plus élevé (voir tableau 41.2).

Figure 41.1 • Représentation schématique d'une surface en combustion, montrant les processus de transfert de chaleur et de masse



Source: Drysdale, 1985.

Tableau 41.2 • Points d'éclair et d'inflammation de combustibles liquides et solides

	Point d'éclair en vase clos ¹ (°C)	Point d'inflammation ² (°C)
n-Décane (l)	46	61,5
n-Dodécane (l)	74	103
Essence (indice d'octane 100) (l)	-38	—
Poly(méthacrylate de méthyle) (s)	—	≈310
Poly(méthacrylate de méthyle) ignifugé (s)	—	≈377
Polypropylène (s)	—	≈330
Polypropylène ignifugé (s)	—	≈397
Polystyrène (s)	—	≈367
Polystyrène ignifugé (s)	—	≈445

l = liquide; s = solide.

¹ Mesuré à l'aide de l'appareil à vase clos Pensky-Martens. ² Liquides: mesuré à l'aide de l'appareil à vase ouvert Cleveland. Solides: Drysdale et Thomson (1994). (A noter: les résultats des produits ignifugés ont été obtenus en présence d'un flux thermique de 37 kW/m².)

L'inflammabilité d'un solide dépend donc de la facilité avec laquelle on peut amener sa température de surface au point d'inflammation, par exemple en l'exposant à une chaleur rayonnée ou à un courant de gaz chauds. Cela dépend moins du processus de décomposition chimique que de l'épaisseur et des propriétés physiques du solide, autrement dit de sa *conductivité thermique* (k), de sa *masse volumique* (ρ) et de sa *chaleur spécifique* (c). Les solides minces, comme les copeaux de bois (et toutes les sections minces), peuvent très facilement prendre feu parce que leur masse thermique est faible. Autrement dit, il suffit d'une quantité relativement faible de chaleur pour élever leur température au point d'inflammation. Par contre, lorsque la surface d'un solide d'une certaine épaisseur est chauffée, une partie de la chaleur transmise est dissipée par conduction dans la masse du solide, ce qui limite l'élévation de sa température de surface. Il est possible de prouver que le taux d'élévation de la température superficielle dépend directement de l'*inertie thermique* du solide, c'est-à-dire du produit $k\rho c$. On le constate d'ailleurs en pratique: un matériau épais doté d'une forte inertie thermique (planche de chêne ou bloc de polyuréthane) met plus de temps à prendre feu sous l'effet d'un flux thermique donné qu'un matériau de la même épaisseur, mais d'une inertie thermique moindre (par exemple, panneau isolant en fibre ou mousse de polyuréthane), qui s'enflammera plus rapidement dans les mêmes conditions (Drysdale, 1985).

Les sources d'inflammation

Le schéma de la figure 41.2 présente les étapes de la combustion (*combustion amorcée*). Pour que la combustion puisse s'établir, la *source d'inflammation* doit pouvoir non seulement élever la température de surface au point d'inflammation ou au-dessus, mais aussi enflammer les vapeurs. Une flamme peut remplir les deux rôles, mais un flux de chaleur rayonnée provenant d'une source lointaine peut aussi élever la température au-delà du point d'inflammation et entraîner la formation de vapeurs, sans pour autant les enflammer. Toutefois, si les vapeurs produites sont assez chaudes (c'est-à-dire si la température de surface est beaucoup plus élevée que le point d'inflammation), elles peuvent s'enflammer spontanément lorsqu'elles se mélangent à l'air ambiant. Il s'agit alors d'une *inflammation spontanée*.

Les sources d'énergie qui peuvent amorcer un incendie sont très nombreuses, mais elles ont toutes un point commun: elles résultent d'une forme ou d'une autre de négligence ou d'inaction. Ce sont par exemple les flammes nues, les cigarettes, cigares et autres produits pour fumeurs, l'échauffement par frottement, les appareils électriques (appareils de chauffage et de cuisson, fers à repasser, etc.) et ainsi de suite. On en trouvera un excellent relevé dans Cote (1991). Nous présentons quelques-unes de ces sources dans le tableau 41.3.

Il y a lieu de noter qu'une cigarette allumée ne peut pas directement déclencher une combustion vive (même dans les combustibles gazeux courants), mais elle peut amorcer un *feu couvant* dans les matériaux qui se prêtent à une combustion lente de ce genre. Il s'agit de matériaux qui carbonisent quand ils sont chauffés. Dans un feu couvant, la zone carbonisée s'oxyde en surface, ce qui dégage localement assez de chaleur pour carboniser les zones voisines du combustible. Le processus est très lent, mais peut dans certains cas produire des flammes qui déclencheront très rapidement un incendie.

Un matériau qui se prête à une combustion lente peut également manifester le phénomène d'auto-échauffement (Bowes,

Figure 41.2 • Scénario d'une combustion amorcée

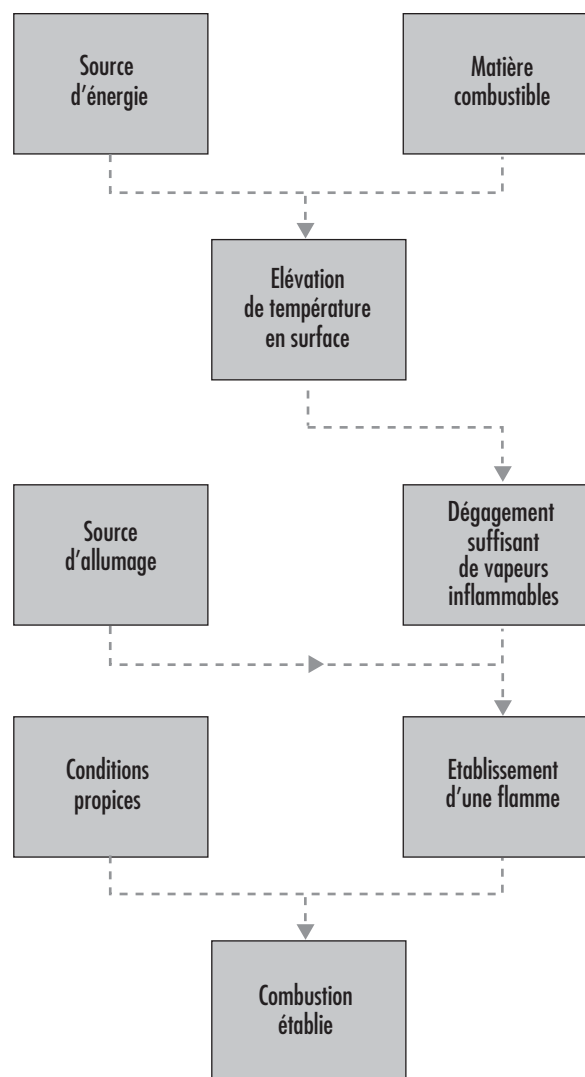


Tableau 41.3 • Sources d'énergie pouvant amorcer une combustion

	Exemples
Appareils électriques	Radiateur électrique, séchoir à cheveux, couverture électrique, etc.
Flamme nue	Allumette, briquet, lampe à souder, etc.
Appareils au gaz	Foyer au gaz, appareil de chauffage individuel, réchaud ou cuisinière à gaz, etc.
Autres appareils de chauffage	Poêle à bois, etc.
Tabac allumé	Cigare, pipe, etc.
Objet chaud	Tuyaux portés à haute température, étincelles d'origine mécanique, etc.
Exposition à une source de chaleur	Foyer proche, etc.
Combustion spontanée	Chiffons imbibés d'huile de lin, tas de charbon, etc.
Réaction chimique	Rare — par exemple, permanganate de potassium et glycérine

1984). Ce phénomène se produit lorsque le matériau est entreposé en grande quantité d'une manière telle que la chaleur produite par une lente oxydation de surface ne peut s'échapper, entraînant une élévation de température dans la masse. Si les conditions s'y prêtent, une telle situation peut mener à une réaction non maîtrisée qui produit un feu couvant à l'intérieur même du matériau.

La propagation de la flamme

La vitesse à laquelle la flamme se propage aux surfaces combustibles voisines joue un rôle de premier plan dans le développement de tout incendie. La propagation de la flamme peut être représentée par la progression d'une onde de combustion: le front de flamme joue le rôle d'une source d'allumage qui amorce la combustion de la matière voisine qui n'a pas encore pris feu. La vitesse de propagation dépend, d'une part, des propriétés qui caractérisent l'inflammabilité et, de l'autre, de l'interaction entre la flamme existante et la surface qui se trouve devant le front de l'onde. La propagation verticale vers le haut est la plus rapide parce qu'elle est accélérée par la montée de l'air chaud, ce qui expose les surfaces qui se trouvent au-dessus de la zone de combustion à la chaleur directe des flammes. Il n'en est pas de même en cas de propagation le long d'une surface horizontale, puisque les flammes de la zone de combustion montent verticalement, s'écartant en fait de la surface. Il est notoire que la propagation verticale est la plus dangereuse (par exemple, le long de rideaux ou d'un vêtement ample, comme une robe ou une chemise de nuit).

La vitesse de propagation augmente également sous l'effet d'un flux imposé de chaleur rayonnante. Lorsqu'un incendie se développe dans une pièce, le feu s'étend plus rapidement par suite du rayonnement thermique, qui croît lui-même à mesure que les flammes progressent. Cela contribue à l'intensification de l'incendie jusqu'au stade de l'embrasement général.

Les aspects théoriques de l'extinction des incendies

L'extinction des incendies peut être examinée à partir des principes théoriques de base brièvement exposés ci-dessus. Les processus de combustion en phase gazeuse (c'est-à-dire les réactions liées aux flammes) sont très sensibles à l'action d'inhibiteurs chimiques. L'action de certains des *ignifugeants* utilisés pour améliorer le

«comportement au feu» des matériaux part du principe que de petites quantités d'un inhibiteur produites en même temps que les vapeurs du combustible peuvent empêcher la formation d'une flamme. La présence d'un ignifugeant ne peut pas rendre incombustible une matière combustible, mais elle peut retarder ou même empêcher l'inflammation si la source d'énergie est faible. Cependant, dans un incendie déjà établi, un matériau ignifugé brûlera aussitôt que les flux thermiques présents auront surmonté les effets de l'ignifugeant.

Il y a différents moyens d'éteindre un incendie:

1. Interrompre l'émission de vapeurs combustibles;
2. Inhiber la flamme à l'aide d'agents extincteurs chimiques (inhibiteurs);
3. Etouffer le feu en le privant d'air (ou d'oxygène);
4. «Souffler» les flammes.

Interrompre l'émission de vapeurs combustibles

La première méthode d'extinction, consistant à interrompre l'émission de vapeurs combustibles, est de toute évidence celle qu'il convient d'adopter dans le cas d'un incendie dû à un jet de gaz, où il est possible de couper tout simplement l'arrivée du combustible. C'est aussi la méthode la plus courante et la plus sûre d'extinction des feux de liquides et de solides. Lorsqu'il s'agit d'un combustible solide, cette méthode nécessite d'abaisser la température de surface en deçà du point d'inflammation, c'est-à-dire jusqu'au point où l'émission de vapeurs est trop faible pour entretenir la flamme. La façon la plus efficace consiste à répandre de l'eau par des moyens manuels ou à l'aide d'un système automatique (sprinklers, eau pulvérisée, etc.). En général, il est impossible d'éteindre de cette manière les feux de liquides: pour les combustibles liquides à bas point d'inflammation, on ne peut tout simplement pas les refroidir suffisamment, et pour les liquides à point d'inflammation élevé, l'eau se vaporise instantanément au contact de la surface surchauffée du combustible, ce qui peut provoquer le débordement du liquide en feu et mettre gravement en danger les personnes qui luttent contre le feu (dans certains cas particuliers, on peut avoir recours à des systèmes d'extinction automatiques à eau pulvérisée sous haute pression, qui sont spécialement conçus pour ce type d'incendie, mais cela n'est pas courant).

En général, on éteint les feux de liquides à l'aide de mousses (Cote, 1991). Ces mousses sont produites par aspiration d'un émulseur dans un courant d'eau, qui est ensuite projeté sur les flammes à l'aide d'une lance spéciale qui permet l'introduction d'air dans le jet. On obtient ainsi une mousse qui flotte à la surface du liquide, freinant la production des vapeurs combustibles par effet de blocage et qui protège la surface contre la chaleur dégagée par les flammes. Cette mousse doit être appliquée soigneusement de façon à former une sorte de tapis qui recouvre progressivement toute la surface du liquide. Les flammes baissent à mesure que ce «tapis» s'étend. En même temps, la mousse se décompose progressivement, libérant de l'eau qui contribue au refroidissement de la surface. Le processus est en fait assez complexe, mais il permet finalement de maîtriser l'émission des vapeurs combustibles.

Il existe une grande variété d'émulseurs, et il est donc important d'en choisir un qui soit compatible avec le type de liquides à protéger. Les premiers appareils de ce genre, les «émulseurs protéiniques», ont été conçus pour combattre les feux d'hydrocarbures liquides, et ils se décomposent rapidement au contact des combustibles liquides solubles dans l'eau. Aujourd'hui, il existe des mousses synthétiques adaptées à toute la gamme envisageable de liquides combustibles. Parmi elles, la mousse AFFF (ou agent formant un film flottant) est un produit polyvalent qui, comme son nom l'indique, forme une pellicule d'eau à la surface du liquide enflammé, ce qui en accroît l'efficacité.

Inhiber la flamme

Cette méthode fait appel à des inhibiteurs chimiques. Les réactions qui se produisent dans la flamme font intervenir des radicaux libres, éléments hautement réactifs qui, bien qu'éphémères, se régénèrent constamment dans une réaction à chaînes ramifiées qui les maintient à une concentration assez élevée pour permettre à la réaction d'ensemble (par exemple, réaction de type R1) de se poursuivre à un rythme rapide. Appliqués en quantité suffisante, ces agents d'extinction chimiques provoquent une baisse considérable de la concentration de ces radicaux, ce qui inhibe la flamme. Les principaux produits qui agissent de la sorte sont les halons et les poudres extinctrices.

Les halons se décomposent dans la flamme, produisant des substances intermédiaires avec lesquelles les radicaux présents préfèrent réagir. Des quantités relativement faibles de halons suffisent pour éteindre un incendie. C'est pour cette raison qu'on les a toujours préférés, car les concentrations nécessaires à l'extinction permettent de maintenir une atmosphère «respirable» (bien que les produits de décomposition sous l'effet des flammes soient nocifs). Les poudres extinctrices agissent d'une manière similaire, mais peuvent être beaucoup plus efficaces dans certaines conditions. Les fines particules de ces poudres sont dispersées dans la flamme, inhibant les chaînes de radicaux. Les particules doivent être aussi fines et nombreuses que possible. De nombreux fabricants obtiennent cet effet en choisissant des poudres qui «décrépissent», c'est-à-dire dont les particules se fragmentent lorsqu'elles sont exposées aux températures élevées des flammes.

Il est reconnu que le meilleur moyen de porter secours à une personne dont les vêtements ont pris feu est d'utiliser un extincteur à poudre qui éteint les flammes et protège la victime. Une intervention rapide permet une «action de choc» pouvant minimiser les blessures. Il importe cependant d'éteindre complètement les flammes parce que les particules de poudre retombent vite au sol, laissant toute flamme résiduelle se rétablir très rapidement. Il en est de même des halons, qui ne demeurent efficaces que si on maintient leur concentration. À l'air libre, les vapeurs des halons se dispersent rapidement, permettant à l'incendie de reprendre s'il reste encore des flammes. Fait plus important, la dispersion de l'inhibiteur est suivie d'un réallumage du combustible si la température de surface est assez élevée. Il y a lieu de noter à cet égard que les halons et les poudres extinctrices n'ont pas d'effet notable de refroidissement de la surface du combustible.

Étouffer la flamme par privation d'air

La description de ce processus est ici très simplifiée. On peut, il est vrai, éteindre un incendie en le «privant de son alimentation en air», et il suffit à cet effet d'abaisser la teneur en oxygène de l'atmosphère ambiante en deçà d'un niveau critique. Le test bien connu de l'indice limite d'oxygène permet de classer les matières combustibles selon la concentration minimale d'oxygène qui permet tout juste d'entretenir une flamme dans un mélange oxygène-azote. Beaucoup de matériaux courants brûlent jusqu'à une concentration d'environ 14% d'oxygène à la température am-

biante (environ 20 °C), en l'absence d'échanges thermiques imposés. Cette concentration critique varie en fonction inverse de la température. Ainsi, un feu qui brûle depuis un certain temps peut entretenir des flammes à des concentrations d'oxygène aussi faibles que 7%. Un incendie qui s'est déclaré dans une pièce peut être maîtrisé et même s'éteindre tout seul si l'alimentation en oxygène est réduite en tenant les portes et les fenêtres fermées. À de très faibles concentrations, il n'y a plus de flammes, mais le feu peut continuer à couver. En ouvrant une porte ou en brisant une vitre avant que la pièce ait eu le temps de refroidir suffisamment, on peut provoquer un *retour de flamme*, violente reprise de l'incendie sous l'effet de l'air frais admis.

Il est difficile de «retirer l'air» d'un local. Toutefois, on peut rendre un milieu «inerte» en le noyant complètement dans un gaz qui ne peut pas entretenir une combustion, comme l'azote, le gaz carbonique ou les gaz issus d'un processus de combustion (par exemple, les gaz d'échappement des moteurs d'un navire), qui contiennent peu d'oxygène et beaucoup de gaz carbonique. Cette technique ne peut servir que dans des espaces clos parce qu'il est nécessaire de maintenir la concentration du gaz inerte jusqu'à ce que le feu soit complètement éteint ou jusqu'à ce que les opérations d'extinction puissent commencer. Cette technique de noyage total a des applications particulières, par exemple pour protéger les cales de navires ou des collections de livres rares dans les bibliothèques. Les concentrations minimales requises de gaz inertes figurent au tableau 41.4. Ces concentrations se fondent sur l'hypothèse que l'incendie est détecté très tôt et que le noyage s'effectue avant que les flammes n'aient provoqué une trop grande accumulation de chaleur dans le local en cause.

Cette «privation d'air» peut être réalisée au voisinage immédiat d'un petit feu par application locale d'un inhibiteur contenu dans un extincteur. Le dioxyde de carbone, ou anhydride carbonique, est le seul gaz qui soit utilisé de cette façon. Mais comme il se disperse rapidement, il est essentiel de ne pas interrompre l'extinction avant d'avoir complètement éteint les flammes sous peine de voir l'incendie reprendre très vite. La réinflammation est également possible parce que le dioxyde de carbone n'a pratiquement pas d'effet de refroidissement. Il y a lieu de mentionner que de l'eau finement pulvérisée sur une flamme peut l'éteindre sous l'action combinée de l'évaporation des gouttelettes (qui refroidit la zone de combustion) et de la réduction de la concentration d'oxygène par dilution dans la vapeur d'eau (qui agit de la même façon que le dioxyde de carbone). On envisage en fait de remplacer les halons par des jets ou des brouillards d'eau finement pulvérisée. Notons ici qu'il est déconseillé d'éteindre un feu de gaz si l'on n'est pas en mesure de couper l'alimentation immédiatement après. Un important volume de gaz inflammable peut s'accumuler et prendre feu par la suite avec des conséquences graves.

Souffler les flammes

Nous mentionnons cette méthode afin de donner un aperçu complet des modes d'extinction. On peut facilement souffler la flamme d'une allumette en portant la vitesse de l'air au-delà d'une valeur critique au voisinage de la flamme, de façon à la déstabiliser à proximité du combustible. En théorie, on devrait pouvoir maîtriser un grand incendie de la même façon, mais il faudrait alors recourir à des charges explosives pour obtenir les vitesses nécessaires. Il est possible d'éteindre de cette manière les puits de pétrole en feu.

Il importe, enfin, de souligner un aspect commun à tous les incendies: la facilité d'extinction varie en raison inverse de l'étendue du feu. Une détection précoce permet d'éteindre l'incendie avec le moins possible de produits extincteurs et de dommages. Le choix du système d'extinction sera fonction de la vitesse potentielle d'évolution du feu et de la nature du système de détection installé.

Tableau 41.4 • Concentration d'inertage de différents gaz

Agent	Concentration minimale (volume %)
Halon 1301	8,0
Halon 1211	8,1
Azote	≈58
Dioxyde de carbone	≈35

Les explosions

Une explosion se caractérise par une libération soudaine d'énergie qui produit une onde de choc ou un souffle pouvant causer des dommages à une grande distance. Il y a deux sources possibles d'explosion: la détonation d'un explosif et l'éclatement par surpression. Le trinitrotoluène (TNT) et le cyclotriméthylènetrinitramine (RDX ou hexogène) sont des exemples d'explosifs détonants. Fortement exothermiques, ces composés libèrent d'énormes quantités d'énergie en se décomposant. Même s'il s'agit de composés thermiquement stables (en fait, certains le sont moins que d'autres et doivent être neutralisés avant de pouvoir être manipulés en toute sécurité), on peut les faire détoner, leur décomposition se propageant alors à travers leur masse à la vitesse du son. Si la quantité d'énergie libérée est assez élevée, une onde de choc partant de la source pourra causer des dommages importants à distance.

En évaluant ces dommages, on peut estimer l'«équivalence TNT» de l'explosion (généralement exprimée en tonnes de TNT). Cette technique se fonde sur la masse de données recueillies sur le potentiel destructif du TNT (surtout en temps de guerre), ainsi que sur des extrapolations empiriques développées à partir de l'étude des dommages provoqués par des quantités connues de TNT.

En temps de paix, les explosifs détonants sont utilisés dans différents secteurs (mines, carrières, construction de grands ouvrages d'art, etc.). Leur présence sur un chantier représente un danger particulier nécessitant des mesures précises de gestion. Toutefois, il est une autre source d'«explosions» qui peut être également dévastatrice, surtout si l'on n'a pas conscience de l'importance des risques encourus. Il s'agit des surpressions à l'origine d'éclatements qui peuvent résulter de réactions chimiques dans des installations industrielles ou d'effets purement physiques, comme lorsqu'un contenant est chauffé par des sources extérieures. Cela explique le sigle *BLEVE* (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion ou explosion due à l'expansion des vapeurs d'un liquide en ébullition) employé à l'origine pour désigner la rupture des chaudières à vapeur. Il est communément utilisé aujourd'hui lorsqu'une enceinte sous pression contenant un gaz liquéfié tel que le GPL (gaz de pétrole liquéfié) se rompt dans un incendie, libérant son contenu hautement inflammable qui s'allume et forme une immense «boule de feu».

La surpression peut aussi être due à une réaction chimique interne. Dans les industries de transformation, l'auto-échauffement peut provoquer une réaction non maîtrisée et engendrer des températures et des pressions assez élevées pour causer un éclatement. Toutefois, les explosions les plus courantes se produisent lorsqu'un mélange inflammable gaz-air prend feu dans une enceinte fermée d'une installation ou dans n'importe quel espace clos. Une explosion ne peut se produire sans la présence d'un mélange inflammable; c'est donc ce qu'il faut éviter par une bonne conception et une bonne gestion des lieux. En cas de dégagement accidentel, une atmosphère inflammable se forme si la concentration du gaz (ou des vapeurs combustibles) se situe entre les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité (voir tableau 41.1). En présence d'une source d'inflammation, une flamme caractéristique des prémélanges gaz-air se propage rapidement à partir de la source, transformant le mélange gazeux en produits de combustion à haute température. La température peut grimper jusqu'à 2 100 K, ce qui revient à dire que dans un système complètement fermé se situant initialement à 300 K, une pression pouvant atteindre 7 bars est possible. Seuls des récipients spécialement conçus peuvent supporter une telle surpression. Des bâtiments ordinaires s'effondreront à moins d'être protégés par des limiteurs de pression (panneaux ou disques de rupture) ou par un système de suppression des explosions. Si un mélange inflammable se forme dans un bâtiment, l'explosion résultante peut endommager la charpente — ou même détruire tout le bâtiment

— à moins que les gaz produits ne puissent s'échapper par les ouvertures (par exemple, les fenêtres brisées) percées par les premières étapes de l'explosion.

Les explosions de ce genre peuvent également se produire si des poussières combustibles en suspension dans l'air s'enflamment (Palmer, 1973). C'est le cas lorsqu'une importante accumulation de poussières «explosives» est délogée d'étagères, d'éléments de charpente ou des rebords d'un bâtiment pour former un nuage qui est ensuite exposé à une source d'inflammation (par exemple, dans une minoterie, un silo à céréales, etc.). Bien sûr, les poussières doivent être combustibles, mais toutes les poussières combustibles n'explorent pas nécessairement à la température ambiante. Des tests normalisés ont été mis au point pour mesurer cette caractéristique. Ils ont permis de constater que les poussières explosives ont des «limites d'explosibilité», semblables par leur principe aux «limites d'inflammabilité» des gaz et des vapeurs. En général, l'explosion de poussières peut causer beaucoup de dommages parce que les premiers stades du phénomène tendent à déloger encore plus de poussières qui épaississent le nuage, celui-ci finissant toujours par s'enflammer pour produire une plus grosse explosion.

Les *événements de décharge* et les *événements de décompression* ne peuvent remplir leur rôle que si l'explosion se développe relativement lentement, comme dans le cas de la propagation d'une flamme de prémélange à travers un mélange inflammable stationnaire ou un nuage de poussières explosives. Les événements ne sont d'aucune utilité en cas de détonation: les orifices de décompression doivent s'ouvrir dès les premiers stades du phénomène, lorsque la pression est encore relativement faible. Si une détonation se produit, la pression augmente trop rapidement pour que la décompression soit efficace et le contenant ou le local subit alors des pressions internes assez élevées pour causer une destruction massive. La *détonation d'un mélange gazeux inflammable* peut se produire si le mélange est contenu dans un long tuyau ou conduit. Dans certaines conditions, la propagation de la flamme pousse les gaz imbrûlés en avant du front de flamme à une vitesse qui accroît la turbulence, ce qui augmente la vitesse de propagation. Il se produit ainsi une rétroaction qui accélère suffisamment la progression des flammes pour former une onde de choc. S'ajoutant au processus de combustion, l'onde de détonation peut atteindre des vitesses dépassant largement 1 000 m/s. Signalons, pour fins de comparaison, que la *vitesse fondamentale de combustion* d'un mélange stœchiométrique propane-air est de 0,45 m/s (c'est la vitesse à laquelle la flamme se propage dans un mélange propane-air à l'état quiescent, c'est-à-dire en l'absence de turbulence).

On ne saurait sous-estimer l'importance de la turbulence dans l'évolution de ce type d'explosion. L'efficacité d'un système de protection contre les explosions dépend d'une décompression ou d'une suppression rapides. Si l'explosion se développe trop vite, le système de protection sera inefficace et les surpressions pourront être très élevées.

La *suppression de l'explosion* peut être substituée à la décompression. Ce type de protection nécessite une détection très précoce, aussi proche que possible de l'allumage. Le déclenchement du détecteur libère instantanément un inhibiteur dans la trajectoire de la flamme en propagation, arrêtant donc l'explosion avant que la pression n'atteigne un niveau pouvant menacer l'intégrité du local ou du récipient. Les halons ont été couramment utilisés à cette fin, mais comme on les élimine progressivement, l'attention se tourne maintenant vers des systèmes à eau pulvérisée sous haute pression. Cette forme de protection est très coûteuse et d'application assez limitée, car elle ne peut servir que dans des espaces relativement exigus où il est possible de répandre l'agent inhibiteur rapidement et uniformément (par exemple, dans des canalisations servant au transport de vapeurs inflammables ou de poussières explosives).

Analyse de l'information pour la protection contre l'incendie

D'une façon générale, ce n'est que récemment que l'étude des incendies a progressé suffisamment pour que ses résultats influent sur la conception des techniques, notamment des mesures de sécurité. Dans le passé, la sécurité incendie s'est développée au cas par cas: on réagissait à des incidents en imposant des règles ou des restrictions destinées à prévenir la répétition des sinistres. Beaucoup d'exemples viennent à l'esprit. En 1666, le grand incendie de Londres a été à l'origine du premier ensemble de règles (ou codes) applicables aux bâtiments et de l'assurance incendie. A notre époque, des incendies de gratte-ciel comme ceux de 1972 et de 1974 à São Paulo, au Brésil, ont conduit les autorités à modifier les codes du bâtiment afin de prévenir des sinistres aussi meurtriers à l'avenir. On s'est attaqué de la même manière à d'autres problèmes. En Californie, on a reconnu le danger que présentent certains meubles modernes capitonnés (particulièrement ceux qui contiennent de la mousse ordinaire de polyuréthane), ce qui s'est traduit par l'adoption d'une stricte réglementation sur l'utilisation des différents produits de rembourrage.

Il s'agit là de quelques cas simples dans lesquels l'étude des conséquences d'un incendie a amené les autorités à imposer des règles destinées à protéger les personnes et les collectivités en cas de feu. La décision de prendre action dans quelque domaine que ce soit doit se fonder sur une analyse des connaissances dont on dispose. Il faut démontrer que le problème perçu est réel. Dans certains cas évidents — comme les incendies de São Paulo —, cela n'est pas nécessaire, mais dans d'autres, il y a lieu de justifier les frais engagés (et «prouver», par exemple, que les meubles modernes peuvent être dangereux). Cela suppose que l'on dispose d'une bonne base de données sur les incendies s'étendant sur une période suffisante pour pouvoir dégager des tendances sur le nombre de sinistres et de victimes, l'incidence d'une cause particulière, etc. On peut ensuite recourir à des techniques statistiques pour déterminer si une tendance ou un changement sont assez significatifs pour nécessiter des mesures correctives.

Dans bon nombre de pays, les services d'incendie sont tenus de présenter un rapport sur chaque sinistre combattu. Au Royaume-Uni et aux Etats-Unis, par exemple, l'officier pompier responsable remplit un formulaire qui est transmis à un organisme central (le ministère de l'Intérieur au Royaume-Uni et l'Association nationale de protection contre l'incendie (National Fire Protection Association (NFPA) aux Etats-Unis), où les renseignements sont codés et traités d'une manière prescrite. Les données qui en résultent sont mises à la disposition des organismes gouvernementaux et d'autres parties intéressées. Ces bases de données sont extrêmement précieuses, par exemple pour mettre en évidence les principales causes d'incendie ou les articles qui sont les premiers à prendre feu. Ainsi, un examen de l'incidence des décès et de leur rapport avec les causes d'incendie a montré que le nombre de victimes d'incendies dus à des produits de tabac est très élevé par rapport au nombre des incendies ayant cette origine.

La fiabilité de ces bases de données dépend de la compétence des sapeurs-pompiers qui réalisent les enquêtes sur les lieux du sinistre. Les enquêtes sur les incendies sont loin d'être faciles. Elles exigent de grandes compétences et des connaissances étendues, notamment dans le domaine des phénomènes liés au feu. Le Service des incendies du Royaume-Uni a l'obligation de rendre compte de chaque sinistre combattu, ce qui impose une lourde responsabilité au sapeur-pompier responsable. La structure du formulaire revêt une importance capitale, car elle doit permettre de fournir l'information nécessaire avec un degré de précision suffisant. La NFPA présente un modèle de base, «Basic Incident Report Form», dans son manuel *Fire Protection Handbook* (Cote, 1991).

Les données peuvent servir de deux façons: soit pour reconnaître un risque d'incendie, soit pour trouver des arguments rationnels sur lesquels fonder une ligne de conduite particulière pouvant nécessiter des dépenses publiques ou privées. Une base de données établie de longue date permet en outre de déterminer les effets de mesures prises dans le passé. Nous avons relevé les dix points suivants dans les statistiques recueillies par la NFPA entre 1980 et 1989 (Cote, 1991):

1. Les détecteurs de fumée à usage domestique sont très répandus et très efficaces (même s'il reste d'importantes lacunes dans la stratégie de détection).
2. Les systèmes d'extinction automatique à eau réduisent considérablement les décès et les dommages matériels.
3. La multiplication des appareils de chauffage portables et des systèmes de chauffage individuel a considérablement accru le nombre d'incendies domestiques attribuables au matériel de chauffage.
4. Le nombre d'incendies criminels et suspects a continué à baisser depuis le sommet enregistré dans les années soixante-dix, mais les dommages matériels correspondants ont cessé de décroître.
5. Une importante proportion des décès enregistrés chez les sapeurs-pompiers est attribuable à des crises cardiaques et à des activités autres que la lutte contre l'incendie.
6. Les régions rurales ont les taux les plus élevés de décès dus à des incendies.
7. Les incendies domestiques les plus mortels sont causés par des produits de tabac enflammés qui mettent le feu à des meubles capitonnés, à des matelas ou à d'autres articles de literie.
8. Aux Etats-Unis et au Canada, les taux de décès dus aux incendies comptent parmi les plus élevés de tous les pays développés.
9. Aux Etats-Unis, ce sont les Etats du «Grand Sud» qui ont les plus hauts taux de décès dus aux incendies.
10. Ce sont les personnes âgées qui courent le plus de risques de mourir dans un incendie.

Ces conclusions sont évidemment propres au pays considéré, mais il y a des tendances communes. Un examen attentif des données peut aider à formuler des politiques rationnelles de sécurité incendie pour la collectivité. Il ne faut pas perdre de vue, cependant, que de telles politiques sont inévitablement «réactives» plutôt que «proactives». Il n'est possible d'envisager des mesures proactives qu'après une évaluation détaillée des risques d'incendie. Cette façon de procéder commence à se généraliser: appliquée d'abord dans l'industrie nucléaire, elle s'est étendue aux industries chimiques et pétrochimiques et aux installations pétrolières en mer, où les risques sont beaucoup plus faciles à définir que dans les autres industries. Son application dans les hôtels et les établissements ouverts au public est beaucoup plus difficile, car il faut recourir à des techniques de modélisation pour prédire le déroulement d'un incendie et la façon dont les produits de combustion se propageront dans l'immeuble et affecteront les occupants. On a réalisé de grands progrès dans ce type de modélisation, mais il reste beaucoup à faire pour en arriver à l'utiliser en toute confiance. Le domaine de la sécurité incendie a encore besoin de longues recherches fondamentales avant qu'il devienne possible d'employer couramment des outils sûrs d'évaluation des risques d'incendie.

● LES CAUSES D'INCENDIE

Tamás Bánky

Il existe diverses définitions des termes de *feu* et de *combustion*. Voici, aux fins du présent texte, les plus importants énoncés relatifs à la combustion, en tant que phénomène:

- La combustion est une suite auto-entretenu de réactions, consistant en transformations physiques et chimiques.
- La matière en combustion réagit avec un agent oxydant ou comburant présent dans son voisinage. Le plus souvent, il s'agit de l'oxygène contenu dans l'air ambiant.
- L'inflammation ou l'allumage de la combustion nécessite des conditions favorables: il faut en général suffisamment de chaleur pour satisfaire la demande d'énergie initiale de la réaction en chaîne que représente la combustion.
- Les réactions sont souvent exothermiques, ce qui veut dire que la combustion dégage de la chaleur. Ce phénomène s'accompagne fréquemment de flammes visibles.

L'*inflammation* peut être considérée comme la première étape du processus auto-entretenu de combustion. Elle est *provoquée* si le phénomène est causé par une source extérieure. Il peut également s'agir d'une *inflammation spontanée* (ou d'*auto-allumage*) si le phénomène résulte de réactions dans la masse même de la matière combustible qui produisent un dégagement de chaleur.

L'aptitude à prendre feu est caractérisée par un paramètre empirique, la *température d'inflammation* (c'est-à-dire la température minimale, déterminée par des essais, à laquelle la matière doit être portée pour brûler). On distingue la *température d'inflammation provoquée* et la *température d'inflammation spontanée*, selon que ce paramètre est déterminé — par des méthodes d'essai spéciales — en recourant ou non à une source d'énergie extérieure.

En cas d'inflammation provoquée, l'énergie nécessaire pour amorcer la réaction de combustion provient de sources extérieures. Toutefois, il n'y a pas de lien direct entre la quantité de chaleur nécessaire et la température d'inflammation. En effet, même si la composition chimique des combustibles considérés constitue un facteur essentiel de la température d'inflammation, cette dernière dépend dans une large mesure de la taille et de la forme des matières en présence, de la pression ambiante, des conditions de circulation de l'air, des caractéristiques de la source d'inflammation, des variables géométriques de l'appareil d'essai, etc. C'est la raison pour laquelle les données publiées relatives aux températures d'inflammation provoquée ou spontanée peuvent varier sensiblement d'un document à l'autre.

Le mécanisme d'inflammation de matières combustibles est facile à illustrer. Nous examinerons à cet effet des matières à l'état solide, liquide et gazeux.

La plupart des *solides* reçoivent l'énergie d'une source d'inflammation extérieure par conduction, convection ou rayonnement (le plus souvent par une combinaison des trois) ou s'échauffent par suite de processus exothermiques internes qui déclenchent une décomposition de surface.

Pour que des *liquides* s'enflamment, ils doivent émettre des vapeurs combustibles à leur surface. Les vapeurs libérées ainsi que les produits de décomposition gazeux se mélangent à l'air, à la surface du liquide ou du solide.

La diffusion ou la turbulence qui se produit dans le mélange aide l'oxygène à atteindre les molécules, les atomes et les radicaux libres qui, à la surface et au-dessus, peuvent entrer en réaction. Les particules réagissent, dégageant de la chaleur. Le processus s'accélère constamment et lorsque la réaction en chaîne s'amorce, la matière combustible prend feu et brûle.

On dit qu'il y a *feu couvant* lorsque la combustion se produit au-dessous de la surface d'une matière combustible solide. Le feu

est dit *incandescent* quand la réaction de combustion se situe à l'interface d'un solide et d'un gaz. La combustion accompagnée de flammes est la manifestation d'un processus exothermique de combustion en phase gazeuse. Il se produit lors de la combustion tant des liquides que des solides.

Les *gaz combustibles* brûlent naturellement en phase gazeuse. On constate empiriquement que les mélanges gaz-air ne peuvent s'enflammer qu'à l'intérieur d'un intervalle défini de concentrations. Cela est vrai aussi pour les vapeurs émises par des liquides. Les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité des gaz et des vapeurs dépendent de la température et de la pression du mélange, de la source d'inflammation et de la concentration du mélange en gaz inertes.

Les sources d'inflammation

Les phénomènes qui produisent de l'énergie thermique peuvent être répartis entre quatre catégories de base selon leur origine (Sax, 1979):

1. L'énergie thermique résultant de réactions chimiques (chaleur d'oxydation, chaleur de combustion, chaleur de solution, auto-échauffement, chaleur de décomposition, etc.).
2. L'énergie thermique d'origine électrique (chauffage par résistance, chauffage par induction, chaleur dégagée par un arc électrique, étincelles électriques, décharges électrostatiques, chaleur engendrée par la foudre, etc.).
3. L'énergie thermique d'origine mécanique (chaleur de frottement, étincelles produites par frottement).
4. La chaleur dégagée par une décomposition nucléaire.

Nous examinerons ci-dessous les sources d'inflammation les plus courantes.

Les flammes nues

Les flammes nues sont sans doute les sources d'inflammation les plus simples et les plus fréquentes. Nombreux sont les outils d'usage général et les différents types d'équipements techniques qui fonctionnent normalement avec des flammes nues ou permettent la formation de telles flammes. Les brûleurs, les allumettes, les chaudières, les systèmes de chauffage, les chalumeaux de soudage, les canalisations brisées de gaz et de pétrole, etc. peuvent tous en pratique être considérés comme des sources possibles d'inflammation. Comme une flamme nue représente en soi une combustion auto-entretenu qui existe déjà, le mécanisme d'inflammation revient en fait à une propagation de cette flamme à un autre élément. Si la source à flamme nue possède suffisamment d'énergie, cet élément commence à brûler.

L'inflammation spontanée

Les réactions chimiques exothermiques présentent un risque d'incendie comme s'il s'agissait de «sources internes d'inflammation». Les substances susceptibles d'auto-échauffement et d'inflammation spontanée peuvent toutefois devenir des sources d'inflammation secondaires en provoquant l'inflammation de combustibles se trouvant dans leur voisinage.

Même si certains gaz (par exemple, le phosphore d'hydrogène, l'hydrure de bore ou l'hydrure de silicium) et certains liquides (par exemple, les métaux carbonyle, ou les composés organométalliques) sont susceptibles d'inflammation spontanée, la plupart des combustions spontanées prennent la forme de réactions de surface dans des solides. L'inflammation spontanée, comme toute inflammation, dépend de la structure chimique de la matière et surtout de son degré de dispersion. Si la surface spécifique est importante, la chaleur de réaction peut s'accumuler localement et contribuer à faire monter la température de la matière au-delà de la température d'inflammation spontanée.

Certains liquides peuvent s'enflammer spontanément s'ils entrent en contact avec de l'air sur des matières solides d'une grande surface spécifique. Les graisses, et particulièrement les huiles insaturées contenant des liaisons doubles, sont susceptibles de s'enflammer spontanément dans des conditions atmosphériques normales lorsqu'elles sont absorbées par des matières fibreuses ou qu'elles imprègnent des textiles d'origine végétale ou animale. De très graves incendies ont été causés par l'inflammation spontanée de produits de laine de verre ou de laine minérale faits de fibres incombustibles ou de matières inorganiques ayant une grande surface spécifique, qui avaient été contaminés par une huile.

L'inflammation spontanée a été principalement observée dans le cas des poussières de matières solides. Un métal ayant une bonne conductivité thermique doit se présenter sous forme de particules assez fines pour prendre feu spontanément sous l'effet d'une accumulation locale de chaleur. La probabilité d'inflammation spontanée est d'autant plus élevée que les particules sont petites. Certaines poussières métalliques (par exemple, le fer pyrophorique) s'enflamment spontanément au simple contact de l'air. Il faut donc prendre des précautions particulières pour prévenir l'inflammation spontanée lors de la manipulation, de l'entreposage et du traitement industriel de la poussière de charbon, de suies à particules très fines et de poussières de laques et de résines synthétiques.

Les matières qui ont tendance à se décomposer spontanément sont particulièrement susceptibles de prendre feu sans source d'inflammation externe. L'hydrazine, par exemple, s'enflamme lorsqu'elle est versée sur n'importe quelle matière d'une grande superficie. Les peroxydes, d'utilisation courante dans l'industrie des plastiques, se décomposent facilement, se transformant en dangereuses sources d'inflammation pouvant à l'occasion amorcer une combustion explosive.

La violente réaction exothermique qui se produit lorsque certains produits chimiques entrent en contact les uns avec les autres peut être considérée comme un cas particulier d'inflammation spontanée. C'est le cas par exemple de l'acide sulfurique concentré avec n'importe quelle matière organique combustible, des chlorates avec des sels ou des acides de soufre ou d'ammonium, des composés organiques halogénés avec les métaux alcalins, etc. Le fait que ces produits soient incapables de se «supporter» les uns les autres (*matières incompatibles*) nécessite une attention particulière lorsqu'il faut les entreposer tant séparément qu'ensemble, ainsi que des règles spéciales de lutte contre l'incendie.

Il convient de mentionner en outre qu'un auto-échauffement dangereux peut dans certains cas résulter de mauvaises conditions matérielles (aération insuffisante, refroidissement déficient, manque d'entretien et de nettoyage, réactions provoquant un dégagement excessif de chaleur, etc.), ou être provoqué par celles-ci.

Certains produits agricoles peuvent également prendre feu spontanément: fourrages fibreux, semences huileuses, céréales germées, produits finis de l'industrie de transformation (tranches de betterave séchée, engrais, etc.). L'auto-échauffement de ces matières présente en outre une caractéristique particulière: les températures dangereuses qui en découlent sont aggravées par certains processus biologiques exothermiques difficiles à maîtriser.

Les sources électriques

Les moteurs, les instruments, les appareils de chauffage, les transformateurs et les appareils d'éclairage électrique ne présentent normalement pas de risque d'incendie s'ils ont été installés conformément aux normes et aux règles de sécurité applicables et si leur fonctionnement est régi par des directives techniques adéquates. Un entretien régulier et des inspections périodiques réduisent considérablement les risques d'incendie et d'explosion. Les causes les plus fréquentes de feu dans les appareils et les câbles électriques sont les *surcharges*, les *courts-circuits*, les *étincelles électriques* et les *résistances de contact élevées*.

Il y a surcharge lorsque le câblage ou un appareil électrique est parcouru par un courant supérieur à celui pour lequel il a été conçu. La surcharge imposée au câblage, aux dispositifs et au matériel peut entraîner une élévation de température telle que les éléments surchauffés sont endommagés ou se cassent, s'usent ou se carbonisent, faisant fondre le revêtement isolant des cordons et des câbles, portant les composants métalliques à l'incandescence, enflammant les éléments structurels combustibles et, si les conditions s'y prêtent, mettant le feu à des objets voisins. Les surcharges sont le plus souvent dues au branchement d'un nombre d'éléments supérieur à celui qui est permis ou à une consommation dépassant la puissance nominale de l'appareil.

Les courts-circuits compromettent souvent la sécurité des systèmes électriques. Ils résultent toujours d'un défaut provoquant le contact accidentel entre un élément de câblage ou un composant isolé sous tension et la terre ou une autre pièce sous tension. Le contact peut être direct (métal-métal) ou indirect, par suite de la formation d'un arc électrique. En cas de court-circuit, la résistance au passage du courant baisse considérablement (souvent de plusieurs ordres de grandeur), donnant lieu à un courant d'une intensité extrêmement élevée. Si le court-circuit est important, le dégagement de chaleur peut être suffisant pour mettre le feu à l'appareil touché et aux objets et matériels voisins, l'incendie se propageant parfois à tout le bâtiment.

Les étincelles électriques sont des sources d'énergie thermique de faible puissance, mais l'expérience montre qu'elles peuvent souvent être à l'origine d'un incendie. Normalement, la plupart des appareils électriques ne produisent pas d'étincelles, mais certains dispositifs le font en fonctionnement normal.

Les étincelles ne sont dangereuses qu'aux endroits où peuvent se former des concentrations explosives de gaz, de vapeurs ou de poussières. Par conséquent, les appareils qui en produisent dans des conditions normales de fonctionnement ne peuvent être installés que dans des lieux où les étincelles ne pourront pas déclencher un incendie. L'énergie contenue dans des étincelles ne suffit généralement pas, par elle-même, à mettre le feu à des objets ou à amorcer une explosion.

Si un circuit électrique comporte des points où le contact métallique entre des éléments traversés par le courant n'est pas parfait, ces points auront une résistance de contact élevée. Dans la plupart des cas, cela résulte de connexions défectueuses ou d'une installation mal faite. Le relâchement des connexions et l'usure normale peuvent également créer des points à haute résistance de contact. Une importante part du courant qui traverse ces points est convertie en chaleur. Si l'énergie thermique ainsi produite ne peut pas se dissiper (et si la source du problème ne peut pas être éliminée), la forte élévation de température qui en résulte peut créer un risque d'incendie.

Si un appareil électrique fonctionnant par induction (moteur, dynamo, transformateur, relais, etc.) est mal conçu, des courants de Foucault d'une intensité excessive peuvent circuler, échauffant certains éléments de l'appareil (bobines et noyaux de fer doux), ce qui peut mettre le feu aux isolants et à l'appareil. Des courants de Foucault, avec leurs effets nuisibles, peuvent également se développer dans les éléments métalliques du matériel haute tension.

Les décharges électrostatiques

La formation d'une charge électrostatique est un processus au cours duquel un corps électriquement neutre à l'origine (et indépendant de tout circuit électrique) acquiert une charge positive ou négative. Cela peut se produire de trois façons:

1. *Charges opposées*: deux corps acquièrent simultanément, par séparation, des charges de polarité opposée.
2. *Charges de passage*: des charges passant au voisinage d'un corps lui laissent une charge de polarité opposée.

3. Charges acquises: charges qu'un corps reçoit de l'extérieur.

Différents processus physiques peuvent engendrer ces trois genres de charges: séparation après un contact, rupture, découpage, pulvérisation, déplacement, frottement, écoulement de poudres ou de fluides dans une canalisation, martelage, changement de pression, changement d'état, photo-ionisation, thermo-ionisation, distribution électrostatique ou décharge haute tension.

La formation de charges électrostatiques peut se produire tant sur des conducteurs que sur des isolants, par suite de n'importe lequel des processus mentionnés ci-dessus. Toutefois, l'accumulation de charges parasites est le plus souvent due à des processus mécaniques.

Les effets nuisibles attribuables aux charges électrostatiques et aux étincelles qui en résultent sont nombreux; cependant, nous en mentionnerons deux en particulier: le risque d'endommager le matériel électronique (par exemple, les ordinateurs servant à commander les processus industriels) et le danger d'incendie et d'explosion.

Le matériel électronique peut être gravement endommagé si l'énergie de la décharge électrostatique est suffisante pour griller le circuit d'entrée d'un semi-conducteur. La multiplication des dispositifs électroniques a considérablement augmenté ce risque au cours de la dernière décennie.

Pour qu'il y ait risque d'incendie ou d'explosion, deux conditions doivent être remplies simultanément: présence d'un combustible et décharge d'énergie suffisante. Ce risque se présente surtout dans l'industrie chimique. On peut l'évaluer d'après la *sensibilité des matières dangereuses aux étincelles (énergie minimale d'inflammation)* et l'importance des charges électrostatiques en cause.

Il est essentiel de réduire ce risque et les nombreuses conséquences qu'il implique, depuis les défaillances techniques jusqu'aux catastrophes occasionnant la perte de vies humaines. On peut recourir à deux moyens pour se prémunir contre les effets des charges électrostatiques:

1. Empêcher la formation des charges électrostatiques (solution évidente, mais, en pratique, très difficile à réaliser).
2. Réduire l'accumulation des charges afin d'empêcher les décharges dangereuses (et les risques qui y sont associés).

La foudre est un phénomène atmosphérique naturel de nature électrique, qui peut constituer une source d'inflammation. Les charges électrostatiques portées par les nuages peuvent donner lieu à des décharges à haute énergie en direction de la terre (*foudre*). Ces décharges peuvent mettre le feu aux combustibles se trouvant à l'endroit frappé par la foudre et aux alentours. Il arrive également que la foudre produise des impulsions extrêmement puissantes dont l'énergie est dissipée en plusieurs étapes. Dans d'autres cas, des courants durables pouvant atteindre 10 A commencent à circuler.

L'énergie thermique d'origine mécanique

Dans toute opération mécanique, le frottement produit de la chaleur. Si, dans un système, les pertes sont réduites au point de permettre une accumulation de cette chaleur, la température du système peut s'élever suffisamment pour provoquer un incendie.

Certaines opérations d'usinage de métaux produisent des étincelles par suite d'un frottement intense (meulage, burinage, découpage, martelage). La chute d'une pièce ou d'un outil métallique sur un plancher dur peut également produire des étincelles, de même que le meulage d'un objet métallique, qui brûle les impuretés du métal. La température des étincelles est souvent supérieure à la température d'allumage des combustibles ordinaires (étincelles provenant de l'acier, 1 400 à 1 500 °C; étincelles provenant d'un alliage nickel-cuivre, 300 à 400 °C). Toutefois, la possibilité d'amorcer une combustion dépend de la chaleur totale

de l'étincelle et de l'énergie minimale d'inflammation du combustible présent. Il est établi, en pratique, que les étincelles produites par frottement présentent un risque réel d'incendie dans les milieux contenant des concentrations élevées de gaz, de vapeurs ou de poussières combustibles. On devrait donc éviter, dans ces circonstances, d'utiliser des matériaux pouvant facilement produire des étincelles ou d'exécuter des opérations pouvant donner lieu à des étincelles d'origine mécanique. Dans ces cas, la sécurité dicte de se servir d'outils en bois, en cuir ou en plastique ne pouvant pas produire d'étincelles, ou encore d'outils en cuivre ou en bronze ne produisant que des étincelles de faible énergie.

Les surfaces chaudes

Les surfaces d'appareils et de matériels peuvent en pratique s'échauffer à un degré dangereux soit en fonctionnement normal, soit par suite de défaillances. Les fours, les chaudières, les dispositifs de séchage, les canalisations d'échappement de gaz de combustion, les conduites de vapeur, etc. causent souvent des incendies dans les atmosphères explosives. De plus, leurs surfaces chaudes peuvent amorcer la combustion des combustibles qui les touchent ou qui se trouvent à proximité. Il importe, pour prévenir l'incendie, de maintenir des distances suffisantes et de procéder régulièrement à des inspections et à des travaux d'entretien afin de réduire la probabilité de surchauffes dangereuses.

Les risques d'incendie liés à différents matériaux et produits

Pour qu'il y ait combustion, il faut de toute évidence que soient mis en présence une matière combustible et un comburant. Les phénomènes de combustion et leurs diverses phases dépendent essentiellement des propriétés physico-chimiques de la matière en cause. Il est donc utile de faire un relevé des propriétés et des caractéristiques de combustibilité des divers matériaux et produits. L'ordre dans lequel ces derniers sont regroupés relève davantage d'aspects techniques que de concepts théoriques (NFPA, 1991).

Le bois et les produits en bois

Le bois est l'un des matériaux les plus courants dans l'environnement humain. Maisons, charpentes, mobilier et d'innombrables biens de consommation sont faits de bois, qui constitue également une matière première largement utilisée dans l'industrie du papier et l'industrie chimique.

Le bois et les produits en bois sont combustibles. Mis en contact avec des surfaces chaudes ou exposés à un rayonnement thermique, à une flamme nue ou à toute autre source d'allumage, ils se carbonisent, deviennent incandescents, s'enflamment ou brûlent, selon les conditions auxquelles ils sont soumis. Pour élargir leur domaine d'utilisation, il faut «améliorer» leurs caractéristiques de combustion. On ignifuge généralement les pièces de charpente en bois (par saturation, imprégnation ou revêtement de surface) pour qu'elles résistent plus longtemps au feu.

La température d'inflammation est à cet égard la plus importante caractéristique des différents types de bois. Sa valeur dépend dans une large mesure de certaines propriétés du matériau et des conditions d'essai, notamment la densité, le degré d'humidité, la taille et la forme de l'échantillon de bois, ainsi que de la source d'inflammation, du temps et de l'intensité d'exposition et de l'atmosphère ambiante. Il est intéressant de noter que différentes méthodes d'essai aboutissent à des points d'inflammation différents. L'expérience montre que les produits en bois propres et secs sont peu susceptibles de s'enflammer d'eux-mêmes, mais en revanche d'innombrables incendies ont été causés par l'inflammation spontanée de déchets de bois imprégnés d'huile et poussières entreposés dans des locaux mal aérés. On a établi empiriquement qu'un haut degré d'humidité élève la température

d'inflammation et réduit la vitesse de combustion du bois. La décomposition thermique du bois est un processus complexe, dont les phases sont toutefois faciles à observer:

- La décomposition thermique avec perte de masse commence déjà entre 120 et 200 °C. La teneur en humidité diminue et des produits de décomposition incombustibles sont libérés dans l'espace de combustion.
- Entre 200 et 280 °C, les réactions qui se produisent sont principalement endothermiques, empruntant de l'énergie à la source d'allumage.
- Entre 280 et 500 °C, les réactions exothermiques des produits de décomposition s'intensifient, prenant le pas sur les autres processus présents. On peut alors observer un phénomène de carbonisation. Dans cet intervalle de température, une combustion entretenue existe déjà. Après l'inflammation, la combustion est instable à cause des propriétés d'isolation thermique des couches carbonisées. Par conséquent, les couches intérieures ne s'échauffent que très lentement. La combustion n'est complète que si la libération des produits de décomposition combustibles s'accélère.
- Au-dessus de 500 °C, le bois calciné forme des résidus. Les braises produisent des cendres contenant des matières inorganiques solides et le processus de combustion finit par s'arrêter.

Les fibres et les textiles

Les textiles à base de matières fibreuses que l'on trouve dans l'environnement humain sont en majorité combustibles. Les vêtements, le mobilier et le milieu bâti se composent de textiles en totalité ou en partie. Ils présentent un danger d'incendie au cours de leur production, de leur transformation, de leur entreposage et de leur utilisation.

Les textiles sont faits de matières premières naturelles ou artificielles. Les fibres synthétiques sont utilisées soit seules, soit mélangées à des fibres naturelles. Les fibres d'origine végétale (coton, chanvre, jute, lin) se composent essentiellement de cellulose combustible, dont la température d'allumage est toutefois relativement élevée (≈400 °C). Portées à haute température, elles ont l'avantage de carboniser sans fondre, causant donc aux personnes qui les portent des brûlures relativement moins graves que certaines fibres synthétiques.

Les propriétés de combustion des fibres à base de protéines animales (laine, soie, poils) sont, de ce point de vue, encore plus avantageuses que celles des fibres végétales, leur température d'inflammation étant plus élevée (500 à 600 °C) et leur combustion moins intense, dans des conditions semblables.

L'industrie des plastiques, tablant sur plusieurs excellentes propriétés mécaniques de certains polymères, joue également un rôle important dans la production de différents textiles. Toutefois, parmi les caractéristiques de l'acrylique, du polyester et des fibres thermoplastiques (nylon, polypropylène, polyéthylène), les propriétés de combustion sont les moins avantageuses. Malgré leur température d'allumage élevée (≈400 à 600 °C), la plupart des fibres synthétiques fondent sous l'effet de la chaleur, prennent facilement feu, brûlent intensément, coulent en brûlant et dégagent des quantités considérables de fumée et de gaz toxiques. On peut améliorer ces propriétés par addition de fibres naturelles, et produire ainsi des *textiles à fibres mixtes*. Il est également possible de les ignifuger. Les textiles à usage industriel et les vêtements de protection contre la chaleur sont surtout fabriqués à partir de fibres minérales incombustibles (notamment de fibres de verre et de fibres métalliques).

Du point de vue de la sécurité incendie, les principales caractéristiques des textiles sont leurs propriétés liées à l'inflammabilité, à la propagation de la flamme, à la production de chaleur et à la libération de produits de combustion toxiques. Des méthodes

d'essai spéciales ont été mises au point pour déterminer ces propriétés. Les résultats des essais influent sur les champs d'application des textiles (tentes, literie, mobilier, sièges et revêtements intérieurs de véhicules, vêtements, tapis et moquettes, rideaux, vêtements spéciaux de protection contre la chaleur et les intempéries), ainsi que sur les directives à donner pour limiter les risques qu'ils présentent. Les chercheurs de l'industrie consacrent d'importants efforts à la mise au point de textiles ignifuges qui peuvent supporter des températures élevées (difficilement combustibles, temps d'inflammation assez long, propagation lente des flammes, faible débit thermique), libèrent peu de produits de combustion toxiques et produisent le moins possible de blessures et de dégâts s'ils prennent feu.

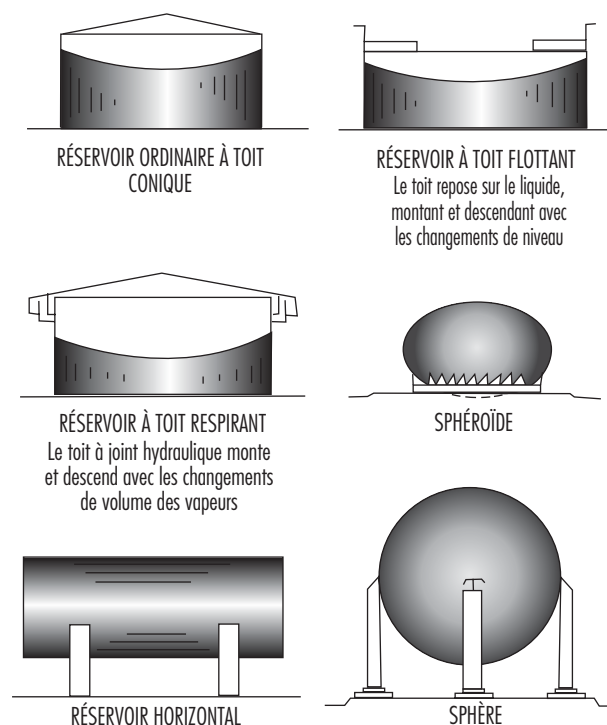
Les liquides combustibles et inflammables

En présence de sources d'inflammation, les liquides combustibles et inflammables présentent des dangers d'incendie. Tout d'abord, les vapeurs que ces liquides dégagent tant à l'air libre que dans des espaces clos créent un risque d'incendie et d'explosion. La combustion et, plus fréquemment, l'explosion, sont possibles si la concentration des vapeurs dans l'air ambiant se situe dans certaines limites. Autrement dit, on peut prévenir l'incendie et les explosions en présence de liquides combustibles et inflammables:

- en éliminant l'air, l'oxygène et toute source d'inflammation;
- en remplaçant l'oxygène ambiant par un gaz inerte;
- en entreposant les liquides dans des récipients ou des systèmes fermés (voir figure 41.3); ou
- en assurant une ventilation suffisante pour empêcher les vapeurs d'atteindre une concentration dangereuse.

En pratique, on évalue le danger des liquides combustibles et inflammables en mesurant différentes caractéristiques: point d'éclair

Figure 41.3 • Types courants de réservoirs destinés à l'entreposage de liquides inflammables et combustibles



en vase ouvert et en vase clos, point d'ébullition, température d'inflammation, vitesse d'évaporation, limites inférieure et supérieure de combustibilité (inflammabilité et explosivité), densité des vapeurs par rapport à l'air et énergie nécessaire pour enflammer les vapeurs. Ces paramètres donnent des renseignements complets sur la combustibilité et l'inflammabilité des liquides.

On se sert, presque partout dans le monde, du point d'éclair, paramètre déterminé par un essai standard dans des conditions atmosphériques normales, pour classer les liquides (ainsi que les matières qui se comportent comme des liquides à des températures relativement basses) en différentes catégories de risque. Pour chacune de ces catégories, on devrait établir les consignes de sécurité à observer pour entreposer les liquides, les manipuler, les utiliser, les traiter et installer du matériel électrique dans leur voisinage. Les zones de risque autour de l'équipement industriel devraient également être définies en fonction de ces catégories. L'expérience montre que, selon la température et la pression, des incendies et des explosions peuvent se produire dans l'intervalle de concentrations situé entre les deux limites d'inflammabilité.

Les gaz

Même si tous les corps peuvent passer à l'état gazeux dans des conditions données de température et de pression, en pratique on ne considère comme des gaz que les matières qui se trouvent dans cet état dans des conditions normales de température et de pression ambiantes (respectivement ≈ 20 °C et ≈ 100 kPa).

Du point de vue des risques d'incendie et d'explosion, les gaz peuvent être répartis entre deux grands groupes: les *gaz combustibles* et les *gaz incombustibles*. Selon la définition acceptée en pratique, les gaz combustibles sont ceux qui brûlent à l'air, avec une concentration normale d'oxygène, pourvu qu'existent les conditions nécessaires à la combustion. Ces gaz ne s'enflamment qu'au-dessus d'une certaine température (température d'inflammation) et dans un intervalle donné de concentration.

Les gaz incombustibles sont ceux qui ne brûlent à aucune concentration ni dans l'air, ni dans l'oxygène. Certains de ces gaz (comme l'oxygène) sont des comburants qui permettent la combustion sans brûler eux-mêmes, tandis que les autres inhibent la combustion. Les gaz incombustibles qui ne sont pas des comburants sont dits *inertes* (azote, gaz rares, dioxyde de carbone, etc.).

Par souci d'économie, les gaz sont ordinairement comprimés, liquéfiés ou réfrigérés et condensés (à l'état cryogénique) dans des réservoirs, des bouteilles ou des récipients pour être entreposés et transportés. Il y a essentiellement deux situations dangereuses: d'une part, lorsque les gaz se trouvent dans un contenant et, de l'autre, lorsqu'ils s'échappent de ce contenant.

Dans le cas des gaz comprimés entreposés dans des contenants, la chaleur extérieure peut considérablement accroître la pression intérieure et ainsi provoquer une explosion. Dans leur contenant, les gaz comportent ordinairement une phase liquide et une phase gazeuse. Les variations de température et de pression peuvent provoquer une expansion de la phase liquide qui comprime alors davantage la phase gazeuse, tandis que la tension de vapeur du liquide augmente avec la température. Ces processus peuvent provoquer des surpressions dangereuses. Les contenants d'entreposage doivent en général comporter des dispositifs de protection contre les surpressions permettant d'éviter les situations dangereuses dues à l'élévation de la température.

Si le contenant d'entreposage est endommagé ou n'est pas étanche, le gaz peut s'échapper dans l'atmosphère, se mélanger à l'air ambiant et, selon la quantité libérée et son mode d'écoulement, causer la formation d'une atmosphère explosive. Au voisinage d'un tel contenant, l'air peut devenir irrespirable et mettre donc en danger la vie des personnes qui se trouvent à proximité par suite soit des effets toxiques du gaz libéré, soit du manque d'oxygène.

Compte tenu des risques d'incendie, il importe de disposer de renseignements détaillés sur les caractéristiques suivantes des gaz entreposés ou utilisés, surtout dans les établissements industriels: propriétés physiques et chimiques, température d'inflammation, limites inférieure et supérieure d'inflammabilité, risques liés à l'entreposage, risques posés par la libération des gaz dans l'atmosphère, étendue des zones de sécurité nécessaires et mesures spéciales à prendre en cas d'incendie.

Les produits chimiques

Il est essentiel de connaître les caractéristiques dangereuses des produits chimiques pour les utiliser d'une façon sûre. En effet, on ne peut prévoir des mesures de prévention ou établir des exigences de protection contre l'incendie sans tenir compte des propriétés physiques et chimiques liées à la combustion. Parmi ces propriétés, les plus importantes sont la combustibilité, l'inflammabilité, les réactions avec d'autres produits, ainsi qu'avec l'air et l'eau, la corrosivité, la toxicité et la radioactivité.

On peut s'informer sur les propriétés des produits chimiques en consultant les notes techniques publiées par les fabricants, de même que les manuels portant sur les produits chimiques dangereux. Ces sources fournissent de l'information non seulement sur les caractéristiques techniques générales de ces produits, mais aussi sur la valeur de différents paramètres à considérer (température de décomposition, température d'inflammation, concentrations limites de combustibilité, etc.), sur leurs comportements particuliers et sur les exigences d'entreposage et de sécurité incendie, ainsi que des recommandations en matière de premiers soins et de traitement médical.

En rapport avec l'incendie, la toxicité des produits chimiques peut intéresser à deux titres. D'abord, la forte toxicité de certains produits peut en elle-même être dangereuse dans un incendie. Ensuite, leur présence dans la zone d'un sinistre peut en fait empêcher les opérations d'extinction.

Même s'ils ne sont pas eux-mêmes combustibles, les oxydants (nitrates, chlorates, peroxydes minéraux, permanganates, etc.) contribuent largement à l'inflammation des matériaux combustibles et peuvent intensifier leur combustion ou lui donner un caractère explosif.

Le groupe des produits chimiques dits instables (aldéhyde acétique, oxyde d'éthylène, peroxydes organiques, acide cyanhydrique, chlorure de vinyle) comprend les composés qui se polymérisent ou se décomposent spontanément ou très facilement, donnant lieu à de violentes réactions exothermiques.

Les produits sensibles à l'eau et à l'air (oxydes, hydroxydes, hydrures, anhydrides, métaux alcalins, phosphore, etc.) sont extrêmement dangereux. Ils réagissent à l'eau et à l'air toujours présents dans l'atmosphère normale en dégageant de très grandes quantités de chaleur. S'ils sont eux-mêmes combustibles, ils s'enflamment spontanément. Toutefois, les fractions combustibles qui déclenchent la combustion peuvent aussi exploser en mettant le feu aux matières combustibles qui se trouvent aux alentours.

La majorité des produits corrosifs (comme les acides minéraux — acide sulfurique, acide nitrique, acide perchlorique, etc. — et les halogènes — fluor, chlore, brome, iode) sont de puissants oxydants et ont d'intenses effets destructifs sur les tissus vivants. Ils imposent donc de prendre des mesures spéciales lorsqu'ils sont présents dans un incendie.

Le danger des éléments et des composés radioactifs est intensifié par le fait que les radiations qu'ils émettent agissent de différentes façons, sans compter qu'ils peuvent par eux-mêmes occasionner des incendies. Si un sinistre endommage l'enceinte de confinement de produits radioactifs, il peut libérer des matières émettant des rayonnements γ . Ces matières aux puissants effets ionisants peuvent détruire les organismes vivants. Les accidents nucléaires peuvent en outre être accompagnés d'incendies dont

les produits de décomposition fixent alors par adsorption des contaminants radioactifs rayonnants α et β . Ces produits peuvent provoquer des lésions permanentes chez les personnes participant aux opérations de sauvetage. Leurs effets sont d'autant plus dangereux que les victimes ne ressentent aucun malaise dans un premier temps. Il est évident qu'en cas de combustion de matières radioactives, il faudra surveiller en permanence la radioactivité du site, des produits de décomposition et de l'eau d'extinction à l'aide de détecteurs de particules. La connaissance de ces facteurs doit être prise en considération dans la stratégie d'intervention et dans toutes les opérations complémentaires. Les bâtiments où des matières radioactives sont entreposées, manipulées ou utilisées dans des opérations ou processus doivent être construits en matériaux incombustibles et avoir une résistance au feu élevée. Il faut en même temps y prévoir des systèmes automatiques de détection, d'alerte et d'extinction de grande qualité.

Les explosifs

Les explosifs ont de nombreuses applications militaires et industrielles. Ce sont des produits chimiques et des composés qui, sous l'effet d'une importante force mécanique (coup, choc, frottement) ou d'une amorce de combustion, se transforment soudainement en un énorme volume de gaz par une réaction extrêmement rapide d'oxydation (vitesse de propagation de 1 000 à 10 000 m/s). Le volume des gaz dégagés étant très grand par rapport au volume des explosifs, ces gaz exercent de très hautes pressions sur les surfaces avoisinantes. Une explosion peut donner lieu à de très hautes températures (2 500 à 4 000 °C) qui favorisent la combustion des matières combustibles se trouvant dans la zone de l'explosion.

Des règles très strictes régissent la fabrication, le transport et l'entreposage des explosifs (par exemple, NFPA 495, *Explosive Materials Code*).

A part les explosifs servant à des fins militaires et industrielles, les matières explosives inductives et les produits pyrotechniques présentent également des risques d'incendie. On se sert souvent de mélanges de matières explosives (acide picrique, nitroglycérine, hexogène), mais aussi de mélanges de matières susceptibles d'exploser (poudre noire, dynamite, nitrate d'ammonium, etc.). Les attentats terroristes ont fait connaître le plastique, qui est essentiellement un mélange d'explosif et de plastifiant (cire, vaseline, etc.).

Dans le cas des explosifs, la méthode la plus efficace de protection contre l'incendie consiste à éliminer des environs toute source d'inflammation. Un certain nombre d'explosifs sont sensibles à l'eau ou à divers composés organiques aux propriétés oxydantes. Dans leur cas, l'entreposage ainsi que la nature des substances entreposées à proximité devraient faire l'objet d'un examen soigneux.

Les métaux

L'expérience montre que presque tous les métaux peuvent, dans certaines conditions, brûler dans l'atmosphère normale. Bien sûr, l'acier et l'aluminium de construction, d'une certaine épaisseur, sont considérés comme incombustibles. Toutefois, les poussières d'aluminium, les fines particules de fer et les toiles métalliques faites de fil de métal fin peuvent facilement s'enflammer et brûlent alors avec une forte intensité. Les métaux alcalins (lithium, sodium, potassium), les métaux alcalino-terreux (calcium, magnésium, zinc) ainsi que le zirconium, le hafnium, le titane, etc. prennent feu facilement lorsqu'ils se présentent sous forme de poudre, de limaille ou de bandes minces. Certains métaux sont tellement sensibles qu'on les garde à l'abri de l'air, dans une atmosphère inerte ou dans un liquide avec lequel ils ne réagissent pas.

Les métaux combustibles et ceux qui sont traités pour brûler produisent des réactions de combustion extrêmement violentes. Il

s'agit en fait de processus d'oxydation à grande vitesse qui libèrent considérablement plus d'énergie thermique que la combustion des liquides combustibles et inflammables. Après une phase préliminaire d'incandescence, la combustion des poussières de métal déposées peut devenir rapide et intense. Si les poussières se dispersent et forment un nuage, de graves explosions peuvent se produire. L'intensité de la combustion de certains métaux et leur affinité avec l'oxygène sont telles qu'après s'être enflammés, ils continuent à brûler dans des milieux (par exemple, atmosphère d'azote, de dioxyde de carbone ou de vapeur d'eau) qui servent ordinairement à éteindre les feux de liquides et de solides combustibles.

L'extinction des feux de métaux est une tâche particulièrement difficile pour les sapeurs-pompier. Le choix du produit et celui du procédé d'extinction sont d'une importance capitale. Les feux de métaux peuvent être maîtrisés s'ils sont découverts très tôt, et font l'objet d'une intervention rapide et bien menée de sapeurs-pompier utilisant les méthodes les plus efficaces. On a intérêt dans ces cas à retirer des lieux les métaux et toutes les autres matières combustibles ou, pour le moins, à en réduire le plus possible les quantités.

Il y a lieu d'accorder une attention particulière à la protection contre les rayonnements en cas de combustion de métaux radioactifs (plutonium, uranium). Il faut prendre des mesures préventives pour éviter que des organismes vivants n'absorbent des produits de décomposition toxiques. Parce qu'ils réagissent violemment à l'eau, les métaux alcalins en combustion ne peuvent être éteints qu'avec des poudres extinctrices. Par ailleurs, on ne peut pas éteindre un feu de magnésium avec de l'eau, du dioxyde de carbone, des halons ou de l'azote. En fait, l'utilisation de ces agents peut rendre un sinistre beaucoup plus dangereux. Les seuls agents efficaces sont les gaz rares et, dans certains cas, le trifluorure de bore.

Les plastiques et le caoutchouc

Les plastiques sont des composés organiques macromoléculaires produits synthétiquement ou par modification de substances naturelles. La structure et la forme de ces composés, issus de réactions de polymérisation, de polyaddition ou de polycondensation, influent fortement sur leurs propriétés. Les thermoplastiques (polyamides, polycarbonates, polyesters, polystyrène, poly(chlorure de vinyle), poly(méthacrylate de méthyle)) ont des chaînes moléculaires linéaires ou ramifiées. Les élastomères (néoprène, polysulfures, isoprène, etc.) présentent quelques liaisons transversales, tandis que les plastiques thermodurcissables (polyalkydes, résines époxy, polyuréthanes, etc.) ont de nombreuses liaisons transversales.

Le caoutchouc naturel sert de matière première dans l'industrie du caoutchouc. Il est vulcanisé pour produire le caoutchouc industriel. Les caoutchoucs artificiels, dont la structure est semblable, sont des polymères et des copolymères de butadiène.

La gamme des produits de plastique et de caoutchouc utilisés dans presque tous les domaines de la vie ne cesse de croître. Grâce à leur grande diversité et à leurs excellentes propriétés techniques, ces produits servent à la fabrication d'éléments de charpente, de mobilier, de vêtements, de biens de consommation, de pièces automobiles et de machines.

Comme il s'agit de matières organiques, les plastiques et le caoutchouc sont combustibles. Pour décrire leurs propriétés à cet égard, on se sert d'un certain nombre de paramètres que l'on peut mesurer par des méthodes spéciales. A partir de ces paramètres, il est possible de déterminer le champ d'application de chaque produit et les mesures de sécurité incendie correspondantes. Ces paramètres sont la combustibilité, l'inflammabilité et la tendance à produire de la fumée et des gaz toxiques et à couler en brûlant.

Même si, dans beaucoup de cas, la température d'inflammation des plastiques est plus élevée que celle du bois ou d'autres maté-

riaux, la plupart sont quand même plus faciles à enflammer et ils brûlent plus rapidement et avec une plus grande intensité. Les feux de plastiques sont souvent accompagnés de phénomènes qui entravent l'extinction, comme la production de grandes quantités de fumée opaque pouvant considérablement réduire la visibilité et de divers gaz toxiques (acide chlorhydrique, phosgène, monoxyde de carbone, acide cyanhydrique, gaz nitreux). Les thermoplastiques fondent et coulent sous l'effet de la chaleur et, selon leur emplacement (par exemple, s'ils sont intégrés ou accrochés au plafond), forment des gouttes qui demeurent dans la zone de combustion et peuvent mettre le feu à des matières combustibles se trouvant au-dessous.

L'amélioration des propriétés de combustion est un problème complexe qui préoccupe beaucoup les spécialistes de la chimie des plastiques. Les ignifugeants réduisent la combustibilité, élèvent la température d'inflammation et font baisser la vitesse de combustion et de propagation des flammes. Malheureusement, ils augmentent en même temps la quantité et l'opacité de la fumée ainsi que la toxicité des gaz produits en cas de combustion.

Les poussières

Si l'on ne considère que leur état physique, les poussières relèvent de la catégorie des solides, mais leurs propriétés physiques et chimiques diffèrent de celles des mêmes matières sous forme compacte. Chacun sait que les explosions de poussières peuvent causer des catastrophes dans l'industrie. Des matières normalement incombustibles, comme les métaux, peuvent, sous forme de poussières mélangées à de l'air, exploser au contact d'une source d'inflammation de faible énergie. Bien sûr, le danger d'explosion existe aussi dans le cas des poussières de matières combustibles.

Les poussières peuvent exploser non seulement lorsqu'elles sont en suspension dans l'air, mais aussi lorsqu'elles se sont déposées. De la chaleur peut s'accumuler dans des couches de poussières, donnant lieu à une combustion lente par suite de la réactivité accrue des particules et de leur conductivité thermique réduite. Les poussières peuvent alors être dispersées par des éclairs, ce qui accroît la possibilité d'une explosion.

Les fines particules en suspension présentent un danger encore plus grave. Comme les gaz et les vapeurs combustibles, les poussières ont une plage de concentration dans l'air dans laquelle une explosion peut se produire. Les limites inférieure et supérieure d'explosibilité et l'intervalle entre les deux points dépendent de la taille et de la distribution des particules. Si la concentration des poussières dépasse la limite supérieure d'explosion, une certaine proportion des particules n'est pas détruite par le feu; elle absorbe de l'énergie, permettant à la pression de l'explosion de demeurer inférieure au maximum. Le degré d'humidité de l'air a également une influence: s'il est élevé, la température d'inflammation du nuage de poussières augmente en proportion de la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'humidité. Si des poussières inertes sont mélangées au nuage combustible existant, l'explosibilité du mélange poussières-air diminue. On peut obtenir le même effet en diluant l'air du mélange au moyen d'un gaz inerte, ce qui réduit la concentration de l'oxygène nécessaire à la combustion.

L'expérience montre que toutes les sources d'inflammation qui possèdent un minimum d'énergie peuvent enflammer des nuages de poussières (flamme nue, arc électrique, étincelle d'origine mécanique ou électrostatique, surfaces chaudes, etc.). D'après les résultats obtenus en laboratoire, l'énergie nécessaire pour enflammer des nuages de poussières est de 20 à 40 fois supérieure à celle qu'il faut pour mettre le feu à des mélanges de vapeurs combustibles et d'air.

Les facteurs qui influent sur le risque d'explosion associé aux dépôts de poussières sont les propriétés physiques et thermiques de la couche, la température d'incandescence des poussières et les

propriétés de combustion des produits de décomposition libérés par la couche de poussières.

LES MESURES DE PRÉVENTION CONTRE L'INCENDIE

Peter F. Johnson

L'histoire nous apprend que le feu a servi à l'être humain pour se chauffer et faire cuire ses aliments, mais qu'il a aussi fait d'énormes ravages. Des incendies ont détruit d'innombrables maisons, d'imposants bâtiments quand ce n'est pas des villes entières.

L'une des premières mesures de prévention contre l'incendie a consisté à imposer l'extinction de tous les feux avant la tombée de la nuit. Ainsi, en 872, les autorités d'Oxford, en Angleterre, faisaient sonner une cloche au crépuscule pour rappeler aux habitants de la ville d'éteindre tous les feux à l'intérieur des maisons en prévision de la nuit (Bugbee, 1978). C'est d'ailleurs de là que vient le mot français couvre-feu.

L'incendie est souvent le résultat d'une action humaine qui permet à une source d'inflammation d'entrer en contact avec une substance combustible (par exemple, déchets de papier laissés près d'appareils de chauffage ou liquides volatils inflammables utilisés à proximité de flammes nues).

Pour qu'un feu prenne naissance, il faut un combustible, une source d'inflammation et un mécanisme quelconque pouvant mettre les deux en contact, en présence d'air ou d'un autre oxydant (comburant). Si l'on pouvait appliquer des stratégies capables de réduire la quantité de combustibles présents, d'éliminer les sources d'inflammation ou d'empêcher l'interaction entre le combustible et la source d'énergie, on réduirait d'autant le nombre d'incendies et, du même coup, le nombre des victimes et l'importance des dommages matériels. La prévention a pris de plus en plus d'importance, ces dernières années, en tant que moyen le plus rentable de faire face au problème des incendies. Il est souvent plus facile (et moins coûteux) d'empêcher un incendie d'éclater que de le maîtriser et de l'éteindre une fois qu'il s'est déclaré.

C'est ce qu'illustre le *Fire Safety Concepts Tree* (NFPA, 1991, 1995a), organigramme des concepts de sécurité incendie mis au point par l'Association nationale de protection contre l'incendie (National Fire Protection Association (NFPA)) aux Etats-Unis, qui montre que par une approche systématique des problèmes de sécurité incendie, il est possible d'atteindre des objectifs tels que la réduction du nombre de décès dus aux incendies en milieu de travail en prévenant l'incendie ou en maîtrisant ses effets.

La prévention des incendies requiert inévitablement de modifier le comportement humain. Elle implique une action de formation des travailleurs à la sécurité incendie, qui soit soutenue par la direction et s'appuie sur les manuels, les normes de formation et les matériels éducatifs les plus récents. Dans de nombreux pays, ces stratégies se fondent sur des mesures législatives qui imposent aux entreprises certains objectifs précis, dans le cadre de leurs obligations en matière de sécurité et de santé au travail.

Nous abordons plus loin la sensibilisation à la sécurité incendie. Pour leur part, les responsables du commerce et de l'industrie se rendent bien compte aujourd'hui de l'importance de la prévention. A cet égard, on utilise beaucoup, au niveau international, les sources documentaires suivantes: *Loss Prevention in the Process Industries* (Lees, 1980); *Fire Prevention Code* (NFPA, 1992); *The Management of Health and Safety at Work Regulations* (ECD, 1992); et *Fire Protection Handbook* de la NFPA (Cote, 1991). A ces documents s'ajoutent de nombreux règlements, normes et matériels de formation élaborés par les gouvernements nationaux, les entreprises et les compagnies d'assurances pour minimiser les pertes de vies et de biens.

La sensibilisation à la sécurité incendie

Si l'on veut que la sensibilisation à la sécurité incendie soit bien réelle, il faut que la sécurité fasse partie des politiques générales de l'entreprise et qu'un plan approprié soit mis en œuvre selon les étapes suivantes: *a)* phase de planification — définition des buts et objectifs; *b)* phase de conception et de mise en œuvre; et *c)* phase d'évaluation — contrôle de l'efficacité.

Les buts et les objectifs

Dans un important article consacré à la sensibilisation à la sécurité incendie, Gratton (1991) définit les différences entre les buts, les objectifs et les pratiques ou stratégies de mise en œuvre. Les buts sont des déclarations d'intention à caractère général qui peuvent être, par exemple, «de réduire le nombre d'incendies, donc de diminuer le nombre de victimes parmi les travailleurs, ainsi que les répercussions financières sur les entreprises».

Les deux aspects de cet objectif général concernant les personnes, d'une part, et les finances de l'entreprise, de l'autre, ne sont pas incompatibles. Les méthodes modernes de gestion des risques ont montré que le fait d'augmenter la sécurité des travailleurs par des mesures efficaces de contrôle des pertes peut être financièrement avantageux pour l'entreprise comme pour la collectivité.

Les buts ainsi définis doivent être traduits en objectifs précis de sécurité incendie pour une entreprise donnée et son personnel. Ces objectifs doivent être mesurables et consistent ordinairement en énoncés de ce genre:

- réduire le nombre d'accidents industriels et les incendies qui en résultent;
- réduire le nombre de morts et de blessés dus aux incendies;
- réduire les dommages matériels subis par l'entreprise.

Pour de nombreuses entreprises, il peut s'y ajouter des objectifs complémentaires, tels que de circonscrire les pertes d'exploitation dues à l'interruption des opérations ou de minimiser le risque d'être déclarées légalement responsables d'un accident.

Certaines entreprises ont tendance à considérer qu'il leur suffit de se conformer aux normes et aux codes locaux du bâtiment pour estimer qu'elles ont atteint leurs objectifs de sécurité incendie. Or, ces codes se limitent généralement aux mesures à prendre pour la sauvegarde de la vie humaine, en partant de l'hypothèse qu'il y aura toujours des incendies.

La conception moderne de la sécurité incendie admet qu'une sécurité absolue n'est pas un but réaliste, mais fixe en revanche un certain nombre d'objectifs mesurables visant à:

- minimiser la fréquence des incendies par des mesures efficaces de prévention;
- prévoir des moyens efficaces pour limiter l'ampleur et les conséquences des incendies au moyen de matériels et de procédures d'urgence adéquats;
- utiliser les régimes d'assurance pour se prémunir contre les grands sinistres, notamment ceux qui découlent de catastrophes naturelles (tremblements de terre, incendies de forêt, etc.).

La conception et la mise en œuvre

La conception et la mise en œuvre de programmes de sensibilisation à la sécurité incendie dépendent dans une très large mesure de l'élaboration de stratégies bien planifiées et de mesures efficaces de gestion et de motivation des personnes. Ces programmes ne peuvent réussir sans un appui énergique et entier de la haute direction. Les stratégies susceptibles d'être adoptées à cet effet ont été définies par Koffel (1993) et par la NFPA, dans son *Industrial Fire Hazards Handbook* (Linville, 1990). Elles visent notamment à:

- faire valoir la politique et les stratégies de sécurité incendie de l'entreprise auprès de tous les employés;

- déterminer tous les scénarios possibles d'incendie et prendre des mesures appropriées pour en réduire le risque;
- se tenir au courant de l'ensemble des normes et codes locaux applicables à chaque branche d'activité;
- établir un programme de gestion des pertes pour mesurer toutes les pertes subies et les comparer aux objectifs fixés;
- donner à tous les employés une formation adéquate dans les domaines de la prévention et des techniques d'intervention en cas d'urgence.

Voici quelques exemples internationaux de stratégies de mise en œuvre:

- L'Association de protection contre l'incendie (Fire Protection Association (FPA)) au Royaume-Uni donne des cours menant au *European Diploma in Fire Prevention* ou diplôme européen en prévention des incendies (Welch, 1993).
- L'Association suédoise de protection contre l'incendie a fondé une filiale, SweRisk, pour aider les entreprises à effectuer des évaluations de risques et à organiser des programmes de prévention contre l'incendie (Jernberg, 1993).
- Au Japon, les citoyens et les travailleurs ont participé de façon massive à l'élaboration des normes de prévention de la Japan Fire Defence Agency (Hunter, 1991).
- Aux États-Unis, la formation en sécurité incendie se base sur les manuels *Firesafety Educator's Handbook* (NFPA, 1983) et *Public Fire Education Manual* (Osterhout, 1990).

Il est absolument essentiel de mesurer l'efficacité des programmes de sensibilisation à la sécurité incendie. Les résultats de cette évaluation favorisent la poursuite du financement des programmes ainsi que leur développement et, le cas échéant, leur adaptation.

C'est probablement aux États-Unis qu'on trouve le meilleur exemple de suivi et de succès dans la sensibilisation à la sécurité incendie. Le programme *Learn Not to Burn*[®] (Protégez-vous du feu), destiné à sensibiliser les jeunes Américains aux dangers des incendies, a été coordonné par la Division de l'éducation publique de la NFPA. Les travaux de suivi et d'analyse effectués en 1990 ont permis d'établir que 194 vies avaient été sauvées au total par suite de mesures de sauvegarde de la vie humaine apprises dans le cadre de programmes de sensibilisation à la sécurité incendie. Près de 30% des vies sauvées sont directement attribuables au programme *Learn Not to Burn*[®] susmentionné.

Les experts estiment en outre que les détecteurs de fumée, dont l'usage tend à se généraliser dans les foyers, et les programmes de sensibilisation à la sécurité incendie développés aux États-Unis expliquent dans une large mesure la baisse du nombre de décès dus aux incendies domestiques, qui est tombé de 6 015 en 1978 à 4 050 en 1990 (NFPA, 1991).

L'ordre et la propreté dans l'industrie

Lees (1980) fait figure d'autorité internationale dans le domaine industriel. Selon lui, les risques d'accidents graves entraînant de nombreuses pertes de vies et de lourds dommages matériels sont aujourd'hui beaucoup plus importants qu'auparavant, dans un grand nombre de branches. Les incendies, les explosions et les dégagements de produits toxiques sont susceptibles de se produire sur une grande échelle, surtout dans les industries pétrochimique et nucléaire.

La prévention revêt donc une importance cruciale. Les installations industrielles modernes peuvent enregistrer de très bons résultats en matière de sécurité incendie grâce à des programmes bien gérés:

- d'ordre et de propreté et d'inspections de sécurité;
- de formation du personnel à la prévention des incendies;
- d'entretien et de réparation du matériel;