

2.1 Introduction

Les risques technologiques (ou anthropiques), sont ceux engendrés par l'activité humaine. Parmi ces risques, on a les risques industriels. Ces derniers, sont qualifiés comme des événements accidentels qui se produisent sur des sites industriels entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, et l'environnement. Plusieurs secteurs sont concernés, comme la pétrochimie, le secteur minier, l'agroalimentaire ou le nucléaire. Leur fonctionnement implique en effet des activités à risques majeurs, mais aussi la manipulation et/ou le stockage de matières dangereuses, répertoriées à haut risque de toxicité, comme les hydrocarbures, les produits inflammables, les engrais, etc... Par conséquent, ces sites industriels sont soumis à des réglementations spécifiques et à des contrôles réguliers.

En général, les risques industriels sont rares, mais leur gravité est importante. Les conséquences varient en fonction de la nature, de la gravité et de localisation de l'accident. Ainsi, les effets des risques industriels sont classés selon trois typologies, qui peuvent se combiner :

- **Effets thermiques** : ils sont liés à une combustion d'un produit inflammable ou combustible ou à une explosion.
- **Effets mécaniques** : Ils résultent d'une onde de choc (déflagration ou détonation), provoquée par une explosion. Celle-ci peut être issue d'un explosif, d'une réaction chimique violente, d'une combustion violente, d'une décompression brutale d'un gaz sous pression ou de l'inflammation d'un nuage de poussières combustibles.
- **Effets toxiques** : ils résultent de l'inhalation d'une substance chimique toxique comme le chlore, l'ammoniac, le phosgène, etc., suite par exemple à une fuite sur une installation, à une réaction chimique ou à la combustion de produits dégageant des fumées toxiques. Les effets sur la santé peuvent se présenter sous la forme, par exemple, d'un œdème du poumon ou d'une atteinte au système nerveux.

Outre les effets directs sur les biens et les personnes, ces phénomènes entraînent généralement une pollution de l'air, une contamination des eaux ou laissent des sols pollués par des produits toxiques.

Dans ce qui suit, on s'intéresse essentiellement aux effets thermiques engendrés par les incendies industriels impliquant des produits combustibles utilisés sur les sites industriels. À mesure d'apprendre davantage sur les feux industriels, on est mieux en mesure de quantifier et de prévoir le comportement au feu des matériaux et d'appliquer les connaissances scientifiques au domaine la sécurité industrielle en cas d'incendies industriels. Dans le présent chapitre, on se propose d'examiner certains des principes qui sont à la base des phénomènes liés au feu, dans le but de pouvoir mieux les appréhender.

2.2 Incendie Industriel

Cette partie sera consacrée à la description du phénomène d'incendie de façon générale à travers la définition de l'incendie industriel, la définition de la combustion, les différentes formes de combustion, le mécanisme la combustion et en fin les flammes d'un incendie.[12]

2.2.1 Définition

On définit l'incendie industriel comme étant une combustion particulièrement exothermique qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace sur un site industriel classé (**figure 2.1**).



2.2.2 Combustion

2.2.2.1 Définition

La combustion est une réaction physico-chimique d'oxydo-réduction exothermique, déclenchée par une énergie d'activation, lorsqu'on met en présence sous certaines conditions, trois éléments:

- Un **comburant** (souvent l'oxygène de l'air dans un incendie) joue le rôle d'oxydant,
- Un **combustible** joue le rôle de réducteur.
- Une **source d'énergie d'activation** (par exemple: flamme, étincelles, source de chaleur, électricité ou électricité statique). [12]

2.2.2.2. Formes de combustion

Les différentes formes sous lesquelles une combustion peut être vue sont ;

- **Combustion lente**

Cette forme de combustion se distingue par une absence de flamme et d'incandescence ainsi que par la faible exothermicité de la réaction. Cette combustion peut, sous couvert de modifications réactionnelles, se transformer en combustion vive et conduire à des feux de surface.

- **Combustion vive**

Cette forme de combustion caractérise les feux de surface. Les feux industriels sont en effet une combustion vive, généralement accompagnée de l'émission de lumière et de chaleur. La vitesse d'émission de calories est relativement élevée ce qui entraîne une forte exothermicité de la réaction. Les paragraphes à venir seront donc essentiellement consacrés à ce dernier mode de combustion.

- **Combustion très vive et combustion instantanée**

Ces types de combustions caractérisées par une vitesse de réaction très élevée ne relèvent pas a priori de l'étude des feux industriels.

2.2.2.3. Les combustibles

1°. Combustibles liquides

La tendance naturelle d'un liquide à émettre des vapeurs inflammables peut être reliée à la valeur du point d'éclair de la substance en question. Il est également d'usage de parler de la volatilité des substances en vue de caractériser leur propriété à émettre des vapeurs à une température donnée. De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Certains liquides émettent suffisamment de vapeurs (par évaporation ou ébullition) à la température ambiante (cas de l'essence), d'autres doivent être modérément réchauffés (gasoil, fuel domestique) ; enfin pour ce qui concerne les fuels plus lourds, l'élévation de température doit généralement être importante.

La combustion des produits liquides (ex. les hydrocarbures) concerne précisément les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible au-dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur. [12]

2°. Combustibles solides

Pour les solides, différents processus d'émission de vapeurs sont possibles suivant la nature du combustible. Celle-ci peut être précédée par une réaction de fusion, par exemple, pour certains polymères. A noter que les solides à bas point de fusion ont un comportement similaire aux liquides. De façon générale, la quantité de vapeurs émises par un combustible est notamment fonction de l'élévation de la température à laquelle il est soumis. Pour un combustible solide, le processus d'inflammation suit globalement le même schéma que celui présenté pour les combustibles liquides. L'émission de vapeurs ou gaz inflammables reste toutefois plus complexe puisqu'elle met généralement en jeu des réactions de distillation, de pyrolyse (décomposition thermique du combustible sous l'effet de la chaleur), de fusion et éventuellement de sublimation comme le montre le schéma en **figure (2.2)**.

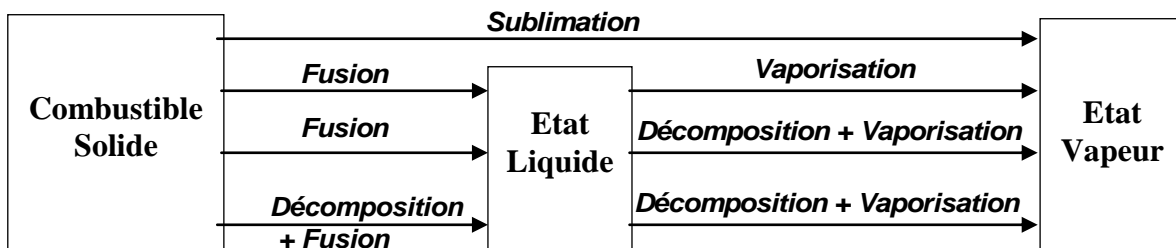


Figure 2-1 : Différents processus d'émission de vapeurs pour le combustible solide [13]

2.2.2.4. Inflammation du mélange gazeux

1°. Domaine d'inflammabilité

Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme. Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut sous l'effet de la poussée d'Archimède tout en continuant à entraîner l'air ambiant. L'essentiel de l'air entraîné (environ 90%) depuis la base de la flamme jusqu'à son sommet dilue les produits de la combustion tout en les refroidissant.

- L'inflammation du mélange gazeux composé d'oxygène de l'air ambiant et des vapeurs de combustibles est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air.
- Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique sur **la figure 2.3**.

Ce domaine est délimité par :

1. la limite Inférieure d'Inflammabilité (**LII**) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. En dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux,

2. la Limite Supérieure d'Inflammabilité (**LSI**) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux.
3. la courbe de condensation dans la partie gauche.
4. la courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation spontanée du mélange (c'est-à-dire sans apport d'énergie extérieure).

Il convient de signaler que les valeurs des (**LII**) et (**LSI**) d'un combustible sont fonction de la température et de la pression et elles sont déterminées expérimentalement pour chaque substance.

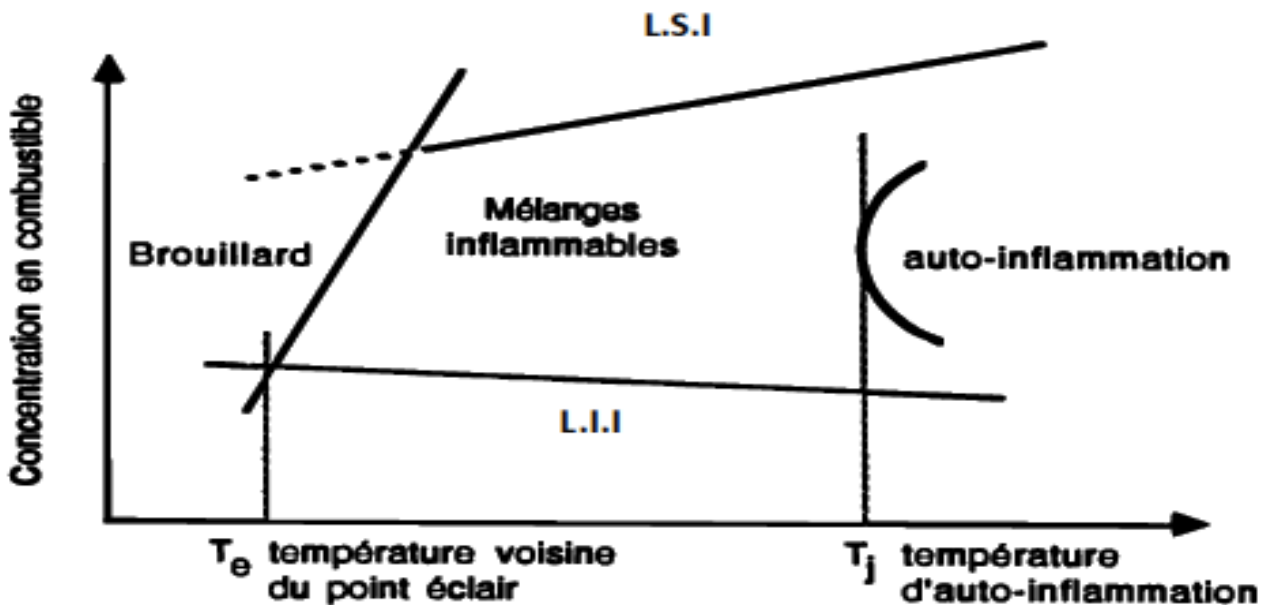


Figure 2.3 : Domaine d'inflammabilité (représentation schématique)(Zabetakis, 1965).

2°. Energie d'inflammation

Lorsque le mélange inflammable formé ne se trouve pas à sa température d'auto-inflammation, il est nécessaire de lui fournir une quantité d'énergie pour déclencher l'inflammation. Cette énergie, appelée énergie d'inflammation, peut être d'origine diverse (étincelles, flamme, foudre...) et varie selon les propriétés de la substance inflammable considérée. L'énergie d'inflammation d'une substance dépend en outre de la concentration en gaz, vapeurs du mélange inflammable.

Elle présente ainsi un minimum, l'énergie minimale d'inflammation (**EMI**), pour le mélange le plus susceptible de s'enflammer. L'énergie minimale d'inflammation correspond sensiblement à un mélange à la stœchiométrie. A noter qu'en général, pour un solide, la quantité d'énergie nécessaire pour générer des vapeurs doit être supérieure à celle nécessaire à la vaporisation d'un liquide.

3° conditions d'inflammation d'un combustible liquide ou solide

Pour qu'il y ait inflammation d'un combustible, il faut que les trois facteurs suivants soient réunis :

1. Une température T supérieure au point d'éclair, afin de disposer d'une quantité suffisante de vapeurs inflammables, au-dessus du liquide ou bien une température T suffisante pour produire des gaz de pyrolyse ;
2. Un mélange air-vapeurs dont la concentration se situe dans les limites d'inflammabilité ;
3. Une énergie d'inflammation suffisante.

Ces trois conditions s'appliquent aux :

- Gaz, distillats dégagés par les combustibles solides et provenant de réactions de distillation ou pyrolyse,
- Vapeurs dégagées par les combustibles liquides et provenant du phénomène d'évaporation.

La combustion est ensuite auto-entretenu si l'énergie rayonnée par la flamme est suffisante pour produire suffisamment de gaz pour réalimenter la flamme.

2.2.2.5 Mécanisme de combustion

La combustion est entretenue par la formation de radicaux libres, atomes ou groupes d'atomes électriquement neutres très instables donc très réactifs. Ces derniers participent fortement au développement du processus des réactions de combustion et à la propagation des flammes.

D'une manière générale, le phénomène de combustion d'un produit intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables. La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse dans la zone qualifiée de " flamme". Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables.

Un incendie est donc un phénomène de combustion auto-entretenu qui ne peut être arrêté que par la disparition du combustible ou du comburant ou de l'apport d'énergie. Ce mécanisme est représenté de manière très schématique sur la **Figure 2.4**.

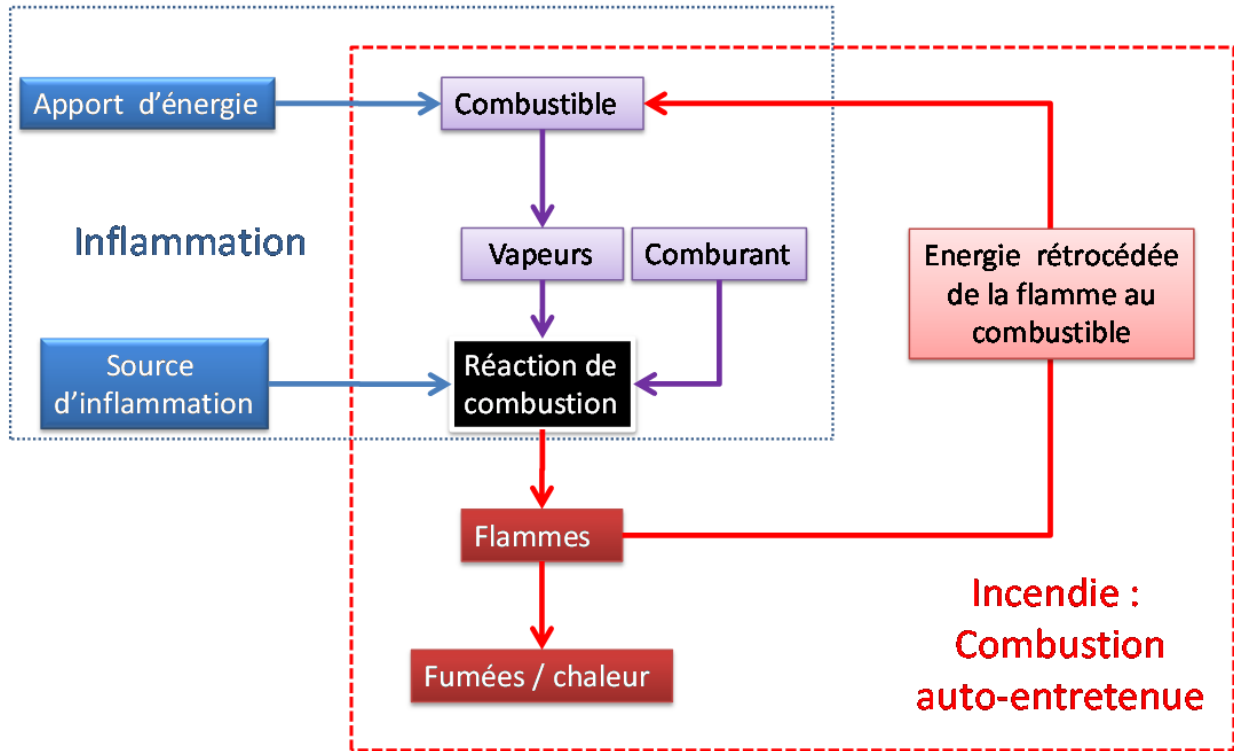


Figure 2.4: Schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue [7]

2.2.2.6. Flamme

La flamme est définie comme la zone où a lieu la combustion en phase gazeuse. La flamme peut ainsi être assimilée à une surface séparant gaz frais et produits de combustion gazeux (CO₂, H₂O, ...) et suies résultant d'une combustion incomplète. Elle correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion. De manière simple, une flamme est composée essentiellement de trois zones (**Figure 2.5**) :

1. Une partie inférieure, dénommée "*zone persistante*" de géométrie quasi constante dans le temps et l'espace. Cette zone se distingue par des températures particulièrement élevées et en conséquence, un pouvoir émissif important.
2. Une partie lumineuse, dénommée "*zone d'intermittente*" pour laquelle la position et la géométrie de la flamme varient fortement au cours du temps. Les températures associées sont sensiblement inférieures aux températures de la zone persistante,
3. Une partie supérieure dénommée "*zone des fumées*" constituées des produits issus de la combustion.

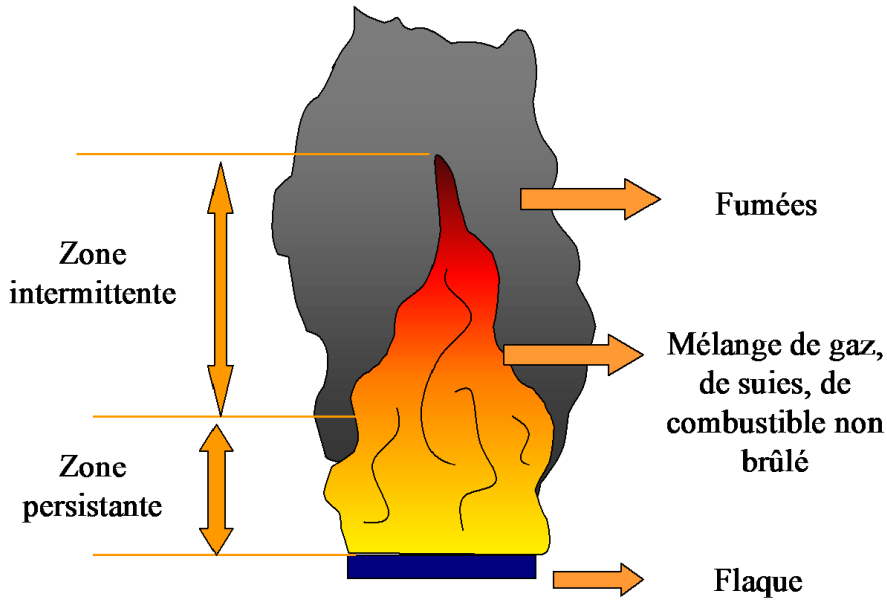


Figure 2.5: Représentation schématique de la flamme [12]

2.3 Thermique d'un incendie

2.3.1 Energie libérée

Lorsque les réactions de combustion sont déclenchées, d'importantes quantités de chaleur sont libérées. Ceci est traduit par la notion de *potentiel calorifique* associé à un combustible, pondérée par le *rendement de combustion* qui définit le rapport entre la quantité de chaleur disponible théoriquement dans l'incendie et celle effectivement libérée.

La quantité d'énergie ainsi émise sous forme de chaleur est notamment transférée vers:

1. l'environnement extérieur de la flamme pouvant entraîner ainsi une propagation de l'incendie
2. le combustible, cette rétrocession d'énergie entretient l'émission de vapeurs inflammables.

Lors de la combustion (**Figure 2.6**) 10% de l'énergie libérée va permettre d'alimenter la réaction, tandis que le reste est libéré sous forme de rayonnement thermique (transfert électromagnétique dans l'infrarouge), de conduction (transport de chaleur dans la masse) et de convection (mouvement des gaz chauds).

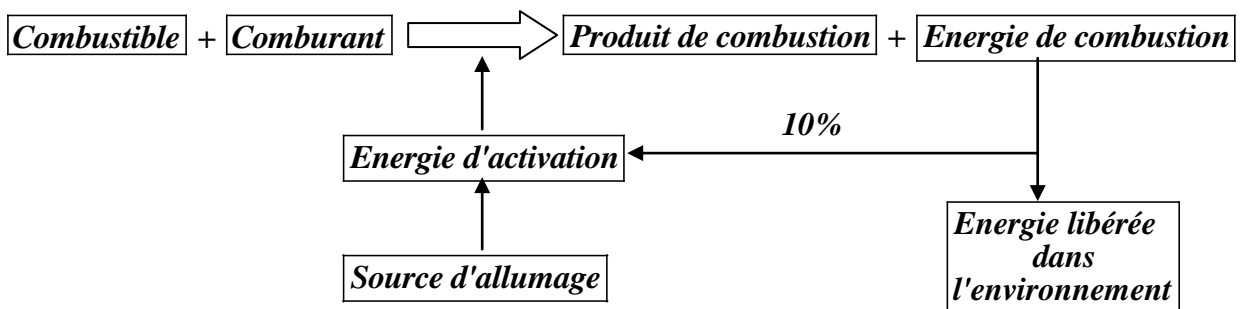


Figure 2.6: Schémas de la combustion d'un incendie

2.3.2. Modes de transport de l'énergie libérée

L'énergie libérée par la combustion est transportée vers le milieu environnant au moyen de trois mécanismes fondamentaux du transfert de chaleur (**Figure 2.7**) : la convection, la conduction et le rayonnement.

Ces trois modes de transfert, ainsi que le transport de brandons incendiaires pour les feux de produits solides, participent à l'éventuelle propagation d'un incendie.

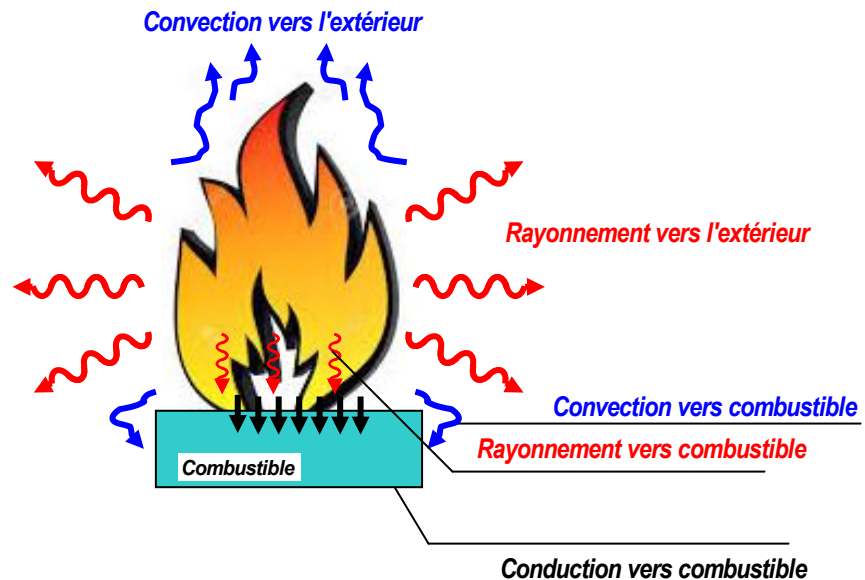


Figure 2.7: Phénomènes thermiques observés dans un feu

2.3.2.1 Convection

La convection est le mode de transfert de la chaleur par le fluide présent dans l'environnement de la flamme (ex. air). Ce mécanisme, impliquant des mouvements de masses d'air chaud, est principalement à l'origine de la propagation verticale de l'incendie et de la formation du panache de fumées. La convection peut être libre ou forcée selon ce qui gouverne le mouvement du fluide en question : différences de densité entre les gaz chauds et l'air froid, action mécanique extérieure telle ventilation, ou désenfumage mécanique. Le phénomène de convection ne pourra être ressenti qu'en se plaçant dans les fumées. Ainsi dans le cas du dimensionnement des effets thermiques d'un incendie industriel sur l'environnement, c'est bien le rayonnement thermique émis par les flammes qui est intéressant.

2.4.2.2 Conduction

La conduction est le mode de transfert de la chaleur à l'intérieur d'un corps conducteur en contact avec une source chaude, par transfert de calories (exemple, propagation d'un bâtiment à l'autre par échauffement des cloisons mitoyennes). Le phénomène de conduction ne pourra être ressenti qu'en touchant un matériau au contact direct des flammes.

2.3.2.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transfert isotrope de la chaleur dégagée par les corps solides, liquides ou gazeux portés à haute température. Le transport de l'énergie thermique est assuré par ondes électromagnétiques. N'exigeant ainsi pas de support matériel, c'est un processus d'échange d'énergie quasi-immédiat entre deux corps distants et susceptibles de générer des effets à des distances importantes. C'est le principal vecteur pour atteindre des cibles humaines potentielles. D'un point de vue physique, le rayonnement est le résultat d'une émission de vibrations électromagnétiques, dont les longueurs d'onde sont approximativement comprises entre **0.1 μm** et **100 μm** (domaine du visible et fractions de l'ultraviolet et de l'infrarouge). Le phénomène de rayonnement La sensation de chaleur que perçoit un observateur lorsqu'il se place en face d'un feu est due au rayonnement émis par les flammes.