



HAL
open science

Modélisation des effets toxiques d'un feu sur l'environnement d'un site industriel : importance des hypothèses relatives à la thermique

Guy Marlair, Yvon Mouilleau

► **To cite this version:**

Guy Marlair, Yvon Mouilleau. Modélisation des effets toxiques d'un feu sur l'environnement d'un site industriel : importance des hypothèses relatives à la thermique. Journée de la Société française des Thermiciens "Dispersion des effluents dans l'atmosphère", Mar 1998, Paris, France. pp.17-37. ineris-00972124

HAL Id: ineris-00972124

<https://ineris.hal.science/ineris-00972124>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION DES EFFETS TOXIQUES D'UN FEU SUR L'ENVIRONNEMENT D'UN SITE INDUSTRIEL : IMPORTANCE DES HYPOTHESES RELATIVES A LA THERMIQUE

Journée d'Etudes « Dispersion des effluents dans l'atmosphère »
Société Française des Thermiciens, Section Convection,
Paris, 18 mars 1998

Guy MARLAIR(*) et Yvon MOUILLEAU(**),
INERIS, Parc technologique Alata, BP2, F 60550 Verneuil-en-Halatte

RESUME

L'évaluation des effets toxiques d'un panache d'incendie sur l'environnement est extrêmement complexe, et la pertinence des calculs de dispersion atmosphérique effectués dans cette optique passe notamment par la détermination correcte du « terme source » de pollution. Ce terme source comprend des données relatives à la composition chimique des fumées produites dans le scénario de feu étudié, mais comprend également des données caractéristiques des aspects thermiques de production et d'évolution du panache, ne serait-ce que par le simple fait que les réactions chimiques de combustion sont systématiquement associées à des transferts d'énergie.

Cette présentation évoque plus particulièrement les principaux paramètres thermiques à prendre en considération, tout au cours d'une étude de dispersion des fumées d'incendie, et souligne la nécessité de bien appréhender ceux-ci pour ne pas compromettre la validité des résultats sur les effets toxiques redoutés sur l'environnement.

L'analyse de l'influence des hypothèses de calcul de dispersion relatives aux facteurs énergétiques est étayée par une étude de cas : celle-ci porte sur la dispersion de panaches d'incendie relatifs à trois scénarios fictifs d'incendie étudiés en régime établi :

- feu d'entrepôt de matières dangereuses (produits de la chimie fine dilués dans des solvants),
- feu d'un stock de soufre en vrac,
- feu de disulfure de carbone, alimenté par une brèche sur un réservoir.

Les simulations de dispersion reposent sur l'utilisation du code « DISFUM » (pour DISpersion des FUMées d'incendie) conçu et développé à l'INERIS.

(*) Ingénieur au département Explosion-Incendie

(**) Ingénieur au département Evaluation, Modélisation et Analyse des risques

1. INTRODUCTION

Les actions directes de la chaleur produite par un feu, telles que les émissions de flammes et de rayonnement thermique, les brûlures, la propagation du feu à d'autres bâtiments ou installations non touchés initialement par les flammes sont les effets les plus immédiatement perceptibles des incendies.

Les effets « chimiques » des feux sont les autres phénomènes à redouter. Ils se traduisent par des conséquences potentielles tout aussi redoutables et aussi variées que la réduction drastique de la visibilité en milieu confiné, les dommages causés après coup aux matériels électroniques par corrosion par les fumées acides et bien entendu, à des degrés divers en fonction de la nature et de la quantité d'aliment au feu impliqué dans l'incendie, par un potentiel de toxicité, principalement par inhalation de fumées. Ce potentiel de toxicité est extrêmement variable et particulièrement difficile à appréhender finement, car de très nombreux composés sont émis simultanément dans des conditions d'incendie, même lorsque les aliments au feu sont des produits banals tels que le bois, les polymères synthétiques, les solvants de base [1]...

Le potentiel de pollution par les eaux d'extinction est enfin un autre effet chimique dont la réalité industrielle n'est plus à démontrer.

Bien que de façon plus implicite, les échanges énergétiques jouent encore un grand rôle dans la naissance, le développement de ces effets, considérés comme « non thermiques », du feu.

Ainsi la visibilité n'est elle généralement réduite par l'opacité des fumées en milieu confiné que dans la mesure où il se produit une déstratification des fumées : dans un premier temps cependant, la libération de l'énergie conduit au « placage » des fumées opaques (la couche chaude) sous plafond. De même, de très importants facteurs liés à la thermique conditionnent notablement la constitution d'un panache d'incendie et son évolution en milieu ouvert, associée au phénomène de dispersion atmosphérique. Ce dernier aspect constitue plus particulièrement l'objet de cette présentation.

2. LES PARAMETRES THERMIQUES FONDAMENTAUX DU FEU

2.1 *Grandeurs énergétiques de base associées aux aliments au feu*

Dans toute démarche d'identification du danger d'incendie et d'évaluation des risques correspondants, une première donnée de base recherchée concerne la charge calorifique disponible et les grandeurs associées. Ces données expriment sous diverses formes l'énergie théoriquement libérable par combustion complète d'un aliment au feu potentiel (tout matériau un tant soit peu combustible constitue un aliment au feu potentiel lors d'un incendie).

On citera plus précisément :

- Les pouvoirs calorifiques : inférieur, dénommé PCI ; supérieur, dénommé PCS, exprimant par unité de masse ou de volume l'énergie libérée par combustion du matériau considéré, l'eau produite par combustion étant respectivement considérée à l'état vapeur, ou condensée à l'état liquide,
- la charge calorifique totale (d'un ensemble, d'un local...) exprimant l'énergie totale disponible par combustion complète de la totalité des matériaux,
- le potentiel calorifique (ou densité de charge calorifique) qui représente la quantité de chaleur susceptible d'être libérée par combustion complète d'un ensemble de matériaux par unité de surface horizontale (sol d'un local, surface de stockage d'un entrepôt...). Cette

dernière donnée sert bien souvent aux assureurs comme première donnée d'évaluation empirique du risque « feu », conformément à la hiérarchisation de la criticité selon le tableau 1.

potentiel calorifique	potentiel calorifique	criticité
~ 418 MJ/m ²	~ 25 kg de bois / m ²	risque faible
~ 837 MJ/m ²	~ 50 kg de bois / m ²	risque moyen
~ 1674 MJ/m ²	~ 100 kg de bois / m ²	risque élevé

Tableau 1 : Potentiel calorifique d'un local et criticité

Dans de nombreux entrepôts de stockage, on atteint très couramment des capacités pratiques d'entreposage de l'ordre d'une tonne de produits par mètre carré de surface au sol, ce qui conduit à des charges calorifiques généralement élevées voire très élevées. Le scénario d'embrassement généralisé de tout ou partie d'un entrepôt de matières combustibles inflammables ou simplement combustibles [2] est donc très couramment étudié dans les études de dangers des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (législation ICPE).

Pour accéder à des données chiffrées précises, on a le choix entre :

- se référer à des documents donnant des valeurs tabulées de PCI ou PCS en diverses unités [3/5] ;
- procéder à une évaluation expérimentale du PCS selon un protocole d'essai normalisé reposant sur l'utilisation d'une bombe calorimétrique (par exemple selon la norme NF M 003)
- se livrer à de classiques calculs de thermochimie, en exploitant la loi de Hess, liant enthalpie de réaction et chaleurs de formation des réactants et des produits de combustion ;
- ou encore exploiter -avec discernement- les corrélations empiriques, établies à l'origine pour les combustibles fossiles, reliant pouvoirs calorifiques (inférieurs ou supérieurs selon le cas) et teneurs massiques des principaux constituants des matériaux combustibles : les formules de Boie⁽¹⁾ ou de Dulong [5/7] sont de bons exemples de ces corrélations empiriques dont les domaines de validation sont à examiner au cas par cas.

Ces corrélations sont de la forme :

$$\text{PCS (kJ/kg)} = x_C(\text{C}) \text{ C}(\%) + x_H(\text{H}) \text{ H}(\%) - x_O(\text{O}) \text{ O}(\%) + x_N(\text{N}) \text{ N}(\%) + x_S(\text{S}) \text{ S}(\%).$$

(Equation 1)

où les x_i sont des fonctions simples de la teneur en constituant i permettent de calculer la contribution au pouvoir calorifique de ce même constituant i .

Tewarson et al [8] proposent également d'autres modèles simples de prédiction du pouvoir calorifique théorique à partir de familles de corrélations tirées du point de fumées des produits, de la forme :

$$\Delta H_{T, i, \infty} = h_{T, i} + [m_{T, i} / M] \quad (2) \quad (\text{Equation 2})$$

où : $h_{T, i}$ et $m_{T, i}$ sont les coefficients (respectivement) massique et molaire de chaleur de combustion propre à la famille chimique du composé dont on cherche le pouvoir calorifique, et M la masse molaire du composé.

(ex. : *n*-alcane : $h_T = 43.6 \text{ kJ/g}$, $m_T = 104 \text{ kJ/mole}$)

Le tableau 2 suivant rappelle quelques ordres de grandeur de pouvoir calorifique des matériaux. Lorsqu'il est exprimé par unité de masse, on peut constater en pratique une plage de variation du PCI de 1 à 25 environ, selon les composés combustibles considérés.

	Pouvoirs calorifiques (exprimés en valeur PCI, MJ/kg)
hydrocarbures C _x H _y	~ 40 (aromatiques) à ~ 45 (alcane)
hydrogène	~ 130
alcools (C à C ₅)	20 à 35
polyoléfines synthétiques	43.5
bois	15 à 17
soufre	~ 10
zinc	5.3

Tableau 2 : Pouvoirs calorifiques de quelques produits

Toutes ces considérations énergétiques constituent un préalable nécessaire à l'examen d'un scénario de feu mais restent néanmoins très insuffisantes pour caractériser le développement du feu au cours du temps :

- il s'agit en effet de données purement statiques, ne donnant accès à aucune prédiction relative à l'évolution essentiellement dynamique d'un feu ;
- ces données ne donnent pas davantage accès à l'énergie effectivement libérée par le feu et emmagasinée à la naissance d'un panache de fumées d'incendie.

Tout incendie passe en effet par une phase de naissance et de croissance, une phase de régime plus ou moins établi et une phase de décroissance (naturelle ou provoquée) se terminant par l'extinction. Les transferts énergétiques du feu vers le panache dépendent des rendements de combustion et de la répartition de l'énergie produite selon les modes de transfert (radiatif, conductif, convectif). Les facteurs d'échelle ne sont guère connus que dans le cas des feux d'hydrocarbures [9].

Seule l'énergie transférée par convection est à considérer dans un calcul de dispersion des constituants d'un panache d'incendie. On retiendra par exemple que dans les grands feux d'hydrocarbures se développant à l'air libre, c'est le mode de transfert radiatif de l'énergie qui gouverne l'état d'équilibre d'un feu de nappe en régime établi, alors que bien souvent, mais pas toujours, le mode de transfert convectif constitue le mode de transfert énergétique prépondérant (en termes de flux) sur l'environnement.

2.2 Energie effectivement libérée par le feu

Des matériaux de natures chimiques différentes mais de pouvoirs calorifiques voisins sont susceptibles de générer des débits calorifiques de valeurs sensiblement différentes. De même, un matériau donné peut libérer son énergie selon une dynamique extrêmement différente selon son état de division et la disponibilité de l'oxygène comburant. Il est donc essentiel de bien appréhender cette grandeur dynamique qu'est le débit calorifique d'un feu dont on souhaite modéliser les effets, quels qu'ils soient. En particulier, l'élévation du panache au droit de l'incendie est fortement liée à l'énergie thermocinétique emmagasinée par celui-ci.

La détermination de valeurs pratiques de débits calorifiques et de rendements énergétiques globaux de combustion des divers produits ou matériaux concernés par les incendies industriels implique bien souvent le recours à l'expérimentation. La figure 1 donne des courbes de débits calorifiques obtenues par des essais en grand réalisés à l'INERIS en galerie d'incendie [10/12]. Ces essais qui ont porté sur des quantités voisines de produits de la chimie fine dans leurs conditionnements commerciaux (1 palette), montrent la grande diversité de situations possibles.

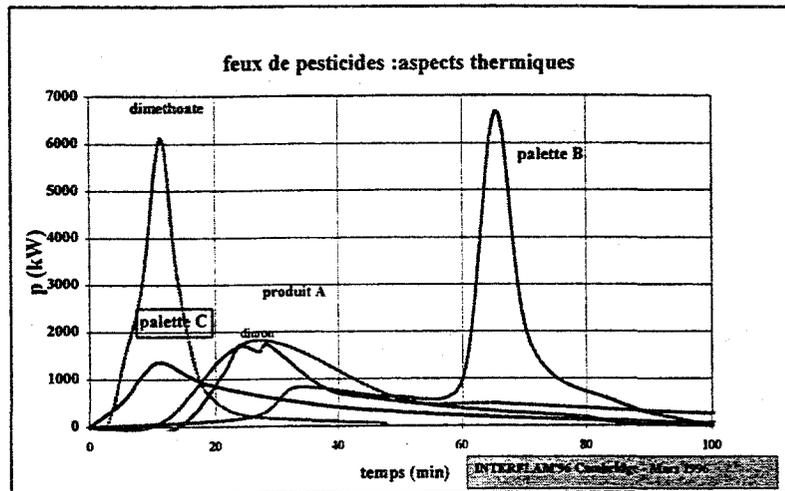


Figure 1 : Courbes expérimentales de débits calorifiques (résultats INERIS)[11]

Des études pertinentes peuvent également s'envisager sur des installations de taille plus modeste, telles que le cône calorimètre ou le calorimètre de Tewarson [14].



Figure 2 : Calorimètre incendie exploité à l'INERIS

L'INERIS vient tout récemment de mettre en service son propre calorimètre (Cf. Figure 2), dérivé de la technologie d'origine américaine du « 50 kW lab-scale flammability apparatus FMRC » développée également en France par Rhône-Poulenc [12/14]. Différentes techniques

permettent d'étudier sur cet appareillage, à l'échelle du laboratoire, les effets de feux de taille industrielle ou de développer des études expérimentales avec étude de la sensibilité des différents paramètres [15/16].

2.3 Energie transmise au panache

L'énergie effectivement transmise au panache dépend notamment du rendement de la combustion et de l'intensité du transfert convectif.

Des expérimentations anciennes [17] sur feux de nappe ont donné les résultats suivants :

		η_{conv} (%/ chaleur théorique)
méthanol	1.16 m ²	87
méthanol	2.37 m ²	81
méthanol	4.6 m ²	76
heptane	1.16 m ²	59/ 64
heptane	2.37 m ²	56

Tableau 3 : Fraction d'énergie convectée pour deux combustibles, selon [17]

Des essais portant sur d'autres combustibles ont permis d'évaluer des fractions d'énergie convectée nettement plus faibles, notamment dans le cas de molécules aromatiques [16] ou dans le cas de feux de polyuréthanes [18]. Dans le cas de feux se démarquant très nettement des hydrocarbures (comme dans le cas de deux des scénarios examinés par la suite), les prévisions en terme de fraction d'énergie ne sont guère envisageables à partir de données de la littérature.

2.4 Autres paramètres liés à la thermique influençant la formation ou l'évolution du panache

G. Heskestad et M.D. Delichatsios [19/21], parmi d'autres chercheurs, ont étudié les lois d'entraînement d'air dans le cas des feux de nappe. Ils ont notamment montré que le débit massique de fluide constituant le panache est presque exclusivement constitué par les entraînements d'air [20] dans la zone réactionnelle, dans le cas des feux librement ventilés : ce constat n'est cependant véritablement validé que pour des feux d'hydrocarbures pour lesquels le rapport massique stoechiométrique air/combustible est voisin de 15, et en l'absence de toute influence de structures dans l'environnement du foyer.

Delichatsios [21] suggère de limiter en pratique les modèles disponibles sur les lois d'entraînement d'air aux combustibles (heureusement les plus nombreux) pour lesquels le rapport massique stoechiométrique air/combustible dépasse au moins la valeur de 10. Des divergences de points de vue subsistent [33] quant à l'interdépendance, affirmée par certains, réfutée par d'autres, entre les entraînements d'air et le débit calorifique généré par le feu.

La température d'émission du panache est bien évidemment un autre paramètre nécessaire à la caractérisation de l'énergie thermocinétique emmagasinée par le panache et qui conditionne la dispersion de ce dernier. La température des fumées à l'émission est cependant directement liée au taux d'entraînement d'air dans le panache et à l'énergie emmagasinée par échange convectif à la source.

3. ANALYSE DE DIFFERENTS SCENARIOS D'INCENDIE : DEFINITION DES HYPOTHESES DE TRAVAIL AU NIVEAU DU TERME SOURCE

La caractérisation fine des propriétés du panache à l'émission à partir des paramètres fondamentaux évoqués précédemment n'est pas toujours chose aisée dans la pratique.

Pour rendre compte de la sensibilité des calculs de dispersion aux valeurs pratiques retenues, nous proposons un examen, sous une forme très simplifiée, de trois scénarios accidentels fictifs relatifs à des contextes industriels plausibles :

3.1 Les produits impliqués dans les simulations

Scénario n°1 : feu d'entrepôt de matières dangereuses

Nous examinons un stockage simplifié sur 1000 m² d'un stock de 950 t de 7 produits de la chimie fine, contenant chacun une matière active diluée à 50% dans un solvant usuel (assimilé au xylène), et conditionnés en emballages plastiques (+ cartons, bois de palettes). Les produits sélectionnés contiennent divers hétéro-atomes sources potentielles de nuisances (S, N, Cl, P, F) à l'origine de toxiques spécifiques (oxydes d'azote, acide cyanhydrique, oxydes de soufre, acide fluorhydrique...). La formule de Boie a été utilisée pour calculer la contribution des matières actives à la charge calorifique de l'entrepôt. Le solvant et les emballages combustibles sont pris en compte sur les plans thermiques et chimiques.

Scénario n° 2 : feu de stock de soufre

Des stocks importants de soufre (sous différentes formes) sont courants dans l'industrie. Nous analysons ici un feu généralisé portant sur 200 tonnes de produit en vrac, réparties sur 300 m² de surface de stockage

Scénario n°3 : feu de nappe de liquide atypique

Nous nous intéressons ici à un feu de nappe de disulfure de carbone survenant suite à une brèche dans un réservoir de 30 tonnes et se traduisant par une nappe de 100 m² auto-alimentée en produit.

3.2 Autres hypothèses de base

3.2.1 Effet des structures ou de la topographie du site

Dans notre analyse, extrêmement simplifiée, nous ne prendrons en compte aucun effet de structure susceptible de modifier le scénario.

3.2.2 Modèle de feu

Dans un souci de simplification, nous considérerons que le scénario de feu est assimilable à un feu de nappe en régime établi. Bien évidemment, les régimes transitoires (phase d'initiation et de propagation du feu, voire phase d'extinction) sont d'autres conditions de feu qui peuvent être prises en compte dans la problématique « toxicité des fumées » [22].

4. ETUDE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES THERMIQUES SUR LA MODELISATION DES EFFETS TOXIQUES

4.1 Le code de calcul DISFUM

La présentation reportée dans ce chapitre du code de calcul appelé « DISFUM » (pour DISpersion atmosphérique des FUMées d'incendie) est très succincte et n'a pour objet que de dégager les principales caractéristiques du modèle.

4.1.1 Détermination des conditions de « rejet » à l'atmosphère

En premier lieu, et préalablement à tout calcul de dispersion atmosphérique proprement dit, il est nécessaire de déterminer :

- l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées,
- leur composition en évaluant plus particulièrement les concentrations en gaz toxiques.

Dans la version 1.0 de DISFUM, l'énergie thermo-cinétique des fumées est estimée au moyen des procédures de calcul recommandées par Heskestad [19, 20, 23, 24]. Pour mémoire, la validité de ces procédures peut être jugée acceptable en l'état des connaissances compte tenu des comparaisons entre les résultats de calculs et les mesures expérimentales reportés notamment dans [25] et [26].

S'agissant de la composition des fumées, il convient d'évaluer les quantités respectives :

- de chaque gaz toxique (comme éventuellement NO_x, HCl, HCN, ...),
- de l'air en excès auquel il faut ajouter l'azote de l'air de combustion.

Pour identifier les gaz toxiques à considérer et quantifier leur émission, l'INERIS se réfère à la composition des combustibles d'une part et aux connaissances acquises expérimentalement quant aux gaz de combustion formés d'autre part ([11] par exemple). Ensuite, l'air en excès qui représente, comme cela a déjà été évoqué plus haut dans cet article, la partie la plus importante des gaz convectés dans les fumées d'incendie, est estimé en se référant à nouveau à Heskestad [19, 20, 23].

Les calculs susmentionnés sont pour partie effectués en faisant appel à des corrélations empiriques établies sur la base d'observations des feux d'hydrocarbures liquides librement ventilés. Dès lors, pour des incendies dont les caractéristiques (hauteur de flamme, puissance dégagée, ...) sont très différentes de ces feux, il convient de considérer avec prudence les résultats de calcul obtenus au moyen d'un code comme DISFUM.

4.1.2 Calcul de la dispersion atmosphérique des fumées

Classiquement et de manière simple, l'approche retenue par l'INERIS pour calculer la dispersion atmosphérique des panaches de fumées toxiques consiste :

- à calculer la trajectoire moyenne de l'axe des panaches considérés,
- à calculer les concentrations en gaz issus des fumées autour de cet axe en supposant une distribution gaussienne.

Pour le calcul de la trajectoire moyenne des panaches, les corrélations de Briggs [27] ou de Holland (reportée dans [28] par exemple) ont été adoptées. Pour le calcul des concentrations en gaz issus des fumées, au niveau du sol ou à hauteur d'homme, les équations retenues sont celles couramment employées et présentées dans [28 ou 29] par exemple.

Sans entrer plus dans les détails, la modélisation proposée tient principalement compte :

- des conditions d'émission (énergie thermo-cinétique des fumées, débit de fluide entraîné, ...),
- de la vitesse du vent,
- de la stabilité de l'atmosphère.

Pour mémoire, la stabilité atmosphérique donne notamment l'aptitude de l'atmosphère à disperser un polluant. A cet égard, la dispersion est d'autant plus favorisée que l'atmosphère est instable. Sans décrire plus les phénomènes qui gouvernent la stabilité atmosphérique, il convient de retenir que celle-ci est notamment fonction de la stratification verticale en température de l'atmosphère. En analysant cette stratification en température, Pasquill [30] a proposé une classification comportant 6 classes de stabilité, notées de A à F, et couvrant le cas des atmosphères très instables (classes A et B), jusqu'aux cas des atmosphères stables à très stables (classes E et F) en passant par les cas neutres (classes C et D). Cette classification, largement employée, est celle retenue dans DISFUM.

Sur le plan des limitations associées au modèle employé, il convient tout particulièrement de relever que :

- le modèle gaussien de dispersion est mal adapté aux conditions météorologiques extrêmes, en particulier aux vents très faibles dont la vitesse est inférieure à 1 m/s,
- ce modèle prend en compte la présence d'obstacles sous la forme d'un paramètre global qui caractérise en fait la « rugosité » du sol ; dès lors, les résultats de calculs ne sont pertinents que si la distance de dispersion du panache est grande devant ces obstacles, ce qui est généralement vérifié à au moins 100 m de la source mais pas en deçà,
- le modèle n'a pas été validé pour des distances au-delà de la source supérieures à 10 km.

4.1.3 Aspects particuliers

Avant de présenter quelques scénarios typiques d'incendie (§ 4.2) et la dispersion des fumées toxiques correspondantes (chapitre 5), il reste à formuler trois remarques importantes.

-1- Tout d'abord, l'influence de la stabilité atmosphérique peut paraître paradoxale. En effet, lorsqu'une atmosphère est instable (classes A et B de Pasquill), la dispersion atmosphérique est favorisée et on pourrait s'attendre à ce que les concentrations en polluants sous le vent de l'émission soit minimales. Toutefois dans le cas des atmosphères instables, un mélange gazeux léger, émis verticalement en continu, conduit à la formation d'un panache très ouvert. En conséquence, une part importante des polluants se disperse vers le sol. Il en résulte que, malgré l'élévation initiale et un processus de dispersion efficace, les concentrations en polluants au sol peuvent être importantes (Cf. Figure 3).

A l'opposé, lorsqu'une atmosphère est stable, son aptitude à diffuser verticalement les polluants est faible. Et, dans le cas d'une émission verticale et continue d'un mélange gazeux

initialement de densité inférieure à celle de l'air ambiant, ceci se traduit par la formation d'un panache très peu ouvert, que certains appellent « panache drapeau ».

La dispersion s'opère donc en altitude et les concentrations de polluants, au sol, sont relativement faibles (Cf. figure 4).

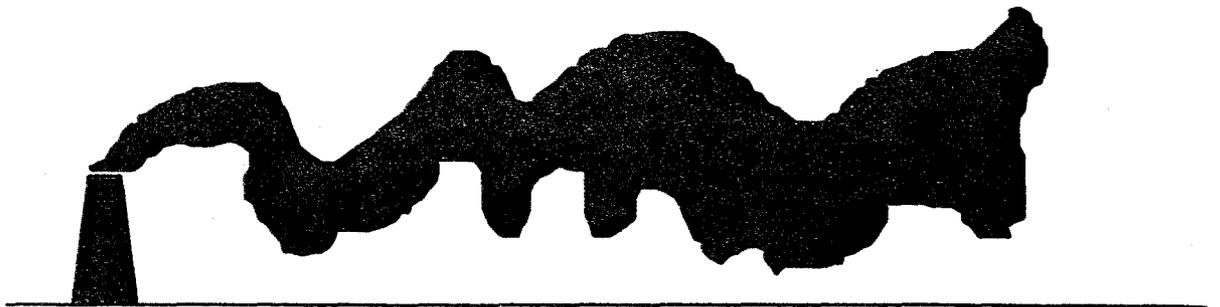


Figure 3 : Dispersion dans une atmosphère instable

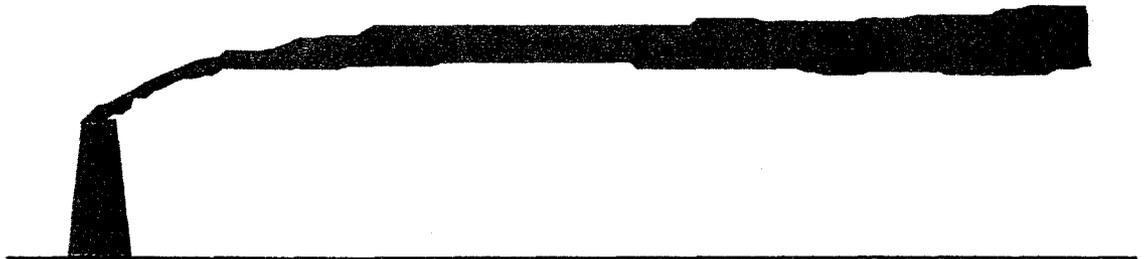


Figure 4 : Dispersion dans une atmosphère stable

-2- Ensuite, l'influence de la vitesse du vent peut aussi conduire à des résultats surprenants. Sur la base d'observations (travaux de Briggs [27] entre autres) et en appliquant les principes de conservation de la physique (conservation de la quantité de mouvement, conservation de la masse,...) il est possible de montrer qu'un panache, initialement composé d'un mélange gazeux léger (comme des fumées), se couche d'autant plus rapidement que la vitesse du vent est importante. Ainsi, la dispersion d'un polluant gazeux léger s'opère d'autant plus près du sol que la vitesse du vent est grande. De ce fait, les concentrations susceptibles d'être observées au sol, sous le vent d'un rejet, peuvent dans certains cas, malgré un grand apport d'air, croître avec la vitesse du vent.

-3- Enfin, il reste à noter le cas particulier de conditions météorologiques telles que la stabilité de l'atmosphère varie avec l'altitude considérée. Ainsi, l'atmosphère peut être instable jusqu'à une altitude Z et éventuellement très stable au-delà. Ce cas est observé en présence d'une couche d'inversion de la stratification verticale de la température de l'atmosphère¹.

Or, les observations montrent qu'une couche d'inversion de température peut se révéler quasiment « infranchissable » par un panache polluant. Il s'ensuit que la dispersion atmosphérique ne s'opère plus dans un espace semi-infini limité par le sol mais dans un espace limité à la fois par le sol et un plan horizontal situé à l'altitude Z . Dans ce cas, la diffusion des

¹ Il est possible de se référer par exemple à [28] pour avoir une description plus détaillée des phénomènes qui gouvernent la stabilité atmosphérique et du cas particulier de la présence d'une couche d'inversion de température.

gaz toxiques se trouve doublement limitée et les concentrations au sol sont, de ce fait, augmentées.

L'altitude Z mentionnée ci-dessus est un paramètre particulièrement important qui conduit à des concentrations en polluants sous le vent d'un incendie d'autant plus importantes que la valeur retenue pour Z est faible. Toutefois, compte tenu de l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées, dans le champ proche de l'incendie (typiquement les 100 premiers mètres) il est clair que malgré la présence d'une couche d'inversion de température, le panache de fumées s'élèverait de toute façon.

Pour déterminer une valeur de Z , défavorable au sens de la dispersion mais aussi réaliste compte tenu de la modélisation retenue ensuite, DISFUM détermine l'altitude critique Z_c , à partir de laquelle une couche d'inversion serait en mesure de stopper l'élévation des panaches malgré leurs énergies thermo-cinétiques restantes. L'exposé de ce calcul sort du cadre du présent article.

4.2 Les scénarios considérés

- Les trois scénarios considérés dans les simulations de dispersion de fumées (feu de matières dangereuses, feu de soufre, feu de dioxyde de carbone) sont respectivement

présentés aux paragraphes 4.2.1, 4.2.2 et 4.2.3, en faisant ressortir des hypothèses basses et hautes quant aux énergies mises en jeu dans les incendies étudiés : ces hypothèses sont justifiées par les incertitudes portant sur un ou plusieurs paramètres tels que pouvoirs calorifiques, vitesses de combustion, rendements de combustion, etc.

Par ailleurs et pour la quasi-totalité des cas considérés, il a été admis que 60 % de l'énergie fournie par les feux serait dissipée dans l'environnement par convection.

Enfin, s'agissant des conditions météorologiques et topographiques retenues, il a systématiquement été admis que :

- la température ambiante est proche de 20 °C,
- une couche d'inversion de température se trouve à l'altitude Z_c ,
- et que la rugosité du site environnant le lieu de l'incendie est caractéristique de celle des sites industriels sans obstacle important.

4.2.1 Scénario n° 1 : feu d'entrepôt de matières dangereuses

L'analyse de la composition de l'entrepôt, telle que fournie en 3.1, conduit aux pouvoirs calorifiques reportés dans le tableau suivant.

Charge calorifique des Matières Actives	10 E6 MJ
Charge calorifique des solvants	19 E6 MJ
Charge calorifique des emballages	3 E6 MJ
Charge calorifique totale	32 E6 MJ

Tableau 4 : Charges calorifiques des différents combustibles dans l'entrepôt

Le rendement de combustion a été pris par hypothèse égal à 90 %. Sans validation expérimentale, il est souvent difficile de fixer a priori une valeur de vitesse de combustion. Dans notre simulation, nous considérons une vitesse de combustion moyenne comprise entre 15 et 45 g/m²/s.

Compte tenu de ces hypothèses, de la composition des produits entreposés et des expérimentations sur ce type d'incendie, il est nécessaire de considérer au moins deux cas pour représenter le spectre des conditions qui pourraient être observées en cas d'incendie de l'entrepôt. Les caractéristiques de ces deux cas sont reportées dans le tableau suivant.

N° d'identification du cas considéré (-)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Puissance dégagée (MW)	Polluants toxiques produits (-)	Flux en polluants toxiques (kg/s)
Cas 1	15	410	CO	4
			CO ₂	31
			NO _x	1.7
			SO ₂	1.5
			HCl	2.6
			HF	0.3
Cas 2	45	1230	CO	12
			CO ₂	93.4
			NO _x	5.2
			SO ₂	4.3
			HCl	7.8
			HF	0.8

Tableau 5 : Caractéristiques possibles du feu d'entrepôt de matières dangereuses

Différentes conditions météorologiques, supposant toutes la présence d'une couche d'inversion de température, ont été considérées. En particulier, les couples « stabilité atmosphérique et vitesse de vent » retenus sont repris dans le tableau ci-après.

Stabilité atmosphérique (-)	Vitesse de vent (m/s)	cas (-)
B	5	cas 1 et 2
C		
D		
D	10	cas 2 seulement
	15	

Tableau 6 : Conditions météorologiques retenues pour chaque cas

4.2.2 Scénario n°2 : feu de stock de soufre

Les valeurs tabulées du pouvoir calorifique relatif au soufre varient de façon significative selon les références consultées [3/5]. De plus, il est là encore difficile de fixer a priori une valeur unique pour la vitesse de combustion. Sur la base de résultats expérimentaux, l'INERIS a retenu des hypothèses sur les vitesses de combustion de 3, 6 et 12 g/m²/s pour ce scénario.

En combinant les incertitudes associées au potentiel calorifique et à la vitesse de combustion et sous l'hypothèse d'un rendement de combustion de 100 %, le spectre des conditions qui pourraient être observées en cas d'incendie du stock de soufre peut être grossièrement évalué au moyen de 3 cas. Les caractéristiques de ces trois cas sont reportées dans le tableau suivant.

N° d'identification du cas considéré (-)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Puissance dégagée (MW)	Polluants toxiques produits (-)	Flux en polluants toxiques (kg/s)
cas 3	3	4.2	SO ₂	1.8
cas 4	6	17.5		3.6
cas 5	12	39.7		7.2

Tableau 7 : Caractéristiques possibles du feu de soufre

Les cas 3 et 5 sont extrêmes en raison des faibles ou fortes puissances dégagées considérées et du fait des hypothèses - parfois extrêmes- retenues. Le cas noté 4 est intermédiaire.

Pour tout ces cas, seules les conditions météorologiques « D - 5 m/s » ont été retenues.

4.2.3 Scénario n°3 : un feu de liquide atypique

S'agissant de la combustion du CS₂ en nappe liquide, les références consultées conduisent à des estimations du pouvoir calorifique qui ne varient que de quelques % autour d'une valeur moyenne, à l'exception néanmoins d'une valeur aberrante publiée dans [3] ... et recopiée dans d'autres bases de données incendie. Une plage de variation raisonnable [40 et 75 g/m²/s], a été prise en considération, centrée sur la seule valeur tabulée (57 g/m²/s)[5] trouvée concernant la vitesse de combustion de ce produit industriel.

Enfin, s'agissant des produits de combustion susceptibles d'être observés, des différences notables dans la composition des fumées sont à considérer selon que la combustion soit complète ou qu'il s'agisse d'un feu sous-ventilé conduisant à une « dégradation » incomplète du combustible et corrélativement à un rendement énergétique plus ou moins élevé.

En combinant les incertitudes quant à la vitesse et au rendement de combustion, le spectre des conditions qui pourraient être observées en cas de feu d'une nappe de CS₂ peut être grossièrement représenté au moyen de 2 cas, décrits dans le tableau 8.

N° d'identification du cas considéré (-)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Puissance dégagée (MW)	Polluants toxiques produits (-)	Flux en polluants toxiques (kg/s)
Cas 6	75	106	CO ₂	4.3
			SO ₂	12.5
Cas 7	40	43	CS ₂	0.4
			CO	0.6
			CO ₂	1.2
			SO ₂	6.1

Tableau 8 : Caractéristiques possibles du feu de CS₂ en nappe liquide

Le cas 6 correspond à un incendie caractérisé par :

- une puissance dégagée estimée par excès, 60 % de l'énergie étant dissipée dans l'environnement par convection,
- et une combustion complète.

A l'opposé, la puissance du feu est estimée par défaut, la part d'énergie transmise par convection à l'environnement est réduite à 20 % et la combustion est supposée incomplète dans le cas 7.

Pour tout ces cas, seules les conditions météorologiques « D - 5 m/s » ont été retenues.

5. Présentation et discussion des résultats

5.1 Préalable

Lorsqu'un effluent toxique est pur, c'est-à-dire composé d'un seul gaz, les résultats d'un calcul de dispersion peuvent être présentés par rapport à un seuil critique tel que le seuil IDLH. Pour mémoire, l'IDLH peut être considéré comme un seuil correspondant à la concentration maximale qu'une personne peut inhaler pendant 30 minutes sans effets « significatifs » sur sa santé.

Dans le cas de fumées d'incendie, plusieurs gaz toxiques sont susceptibles d'être émis simultanément à l'atmosphère. Le seuil à retenir pour caractériser la toxicité des fumées n'est donc plus propre à un gaz pur mais à un mélange de gaz. Dans ce cas, si le mélange est composé de n gaz polluants notés $P_1, P_2, \dots, P_p, \dots, P_n$, il peut être admis qu'un seuil « IDLH équivalent » est atteint lorsque la relation 3 est vérifiée :

$$\sum_{i=1}^{i=n} (\text{Concentration en polluant } P_i) / (\text{IDLH}^2 \text{ du polluant } P_i) = 1$$

(Equation 3)

² Valeur tirée systématiquement de [31]

L'expression précédente permet, de manière simplifiée, d'une part de prendre en compte la toxicité spécifique à chaque gaz et, d'autre part, de « sommer » leurs toxicités respectives. Il est clair qu'une telle approche, retenue faute de mieux, ne permet pas de prendre en compte tout effet de synergies ou d'antagonismes éventuels, induit par la présence simultanée des différents gaz.

Par la suite, les résultats quant aux concentrations en fumées toxiques sous le vent de l'incendie seront exprimées en % du seuil IDLH équivalent tel que défini plus haut. Enfin, avant de passer à la présentation des résultats, il convient de noter que raisonner par rapport à ce type de seuil revient implicitement à considérer une exposition de 30 minutes. Pour une autre durée d'exposition, il conviendrait de raisonner en dose inhalée plutôt que d'utiliser un seuil critique de concentration.

5.2 Résultats obtenus pour le feu d'entrepôt de matières dangereuses

Les résultats de calculs obtenus au moyen de DISFUM dans le cas d'une vitesse de vent de 5 m/s sont reportés sur la figure 5 suivante.

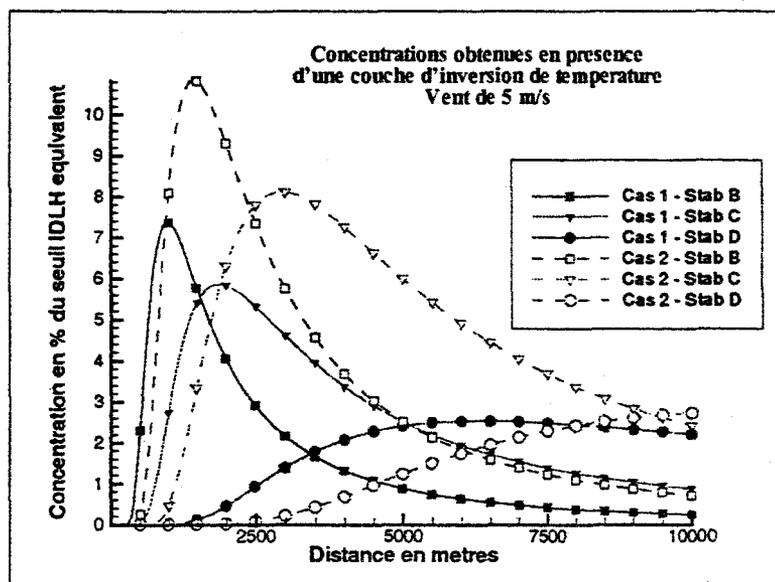


Figure 5 : Evolutions des concentrations en fumées toxiques pour le scénario du feu d'entrepôt de matières dangereuses et pour une vitesse de vent de 5 m/s

Les évolutions de concentration en fumées toxiques reportées sur la figure précédente montrent tout d'abord que le seuil « IDLH équivalent » ne serait a priori pas atteint dans les conditions d'étude considérées. Ensuite, les concentrations maximales sont systématiquement calculées pour le cas correspondant à l'hypothèse majorante quant à la vitesse de combustion (cas 2).

Vis-à-vis de l'influence de la stabilité atmosphérique, il peut être noté que la concentration maximale calculée est d'autant plus importante que l'atmosphère est instable. Ainsi, dans le cas 2 par exemple, cette concentration maximale passe de 3 % du seuil retenu, à presque 9 puis presque 12 % de ce seuil lorsque la stabilité atmosphérique passe de D, à C puis à B, toutes choses égales par ailleurs. Ceci est conforme à la remarque notée -1- du paragraphe 4.1.3.

Enfin, il convient de remarquer que lorsque la distance comptée depuis le lieu de l'incendie est importante, (proche de 10 km) les concentrations en fumées toxiques sont systématiquement plus élevées dans le cas 2.

En revanche, pour un observateur partant du lieu de l'incendie et s'en éloignant sous le vent de l'émission des fumées, il existe toujours une zone pour laquelle les concentrations les plus élevées correspondent au cas 1.

Les résultats de calculs obtenus au moyen de DISFUM dans le cas d'une stabilité atmosphérique D associée à différentes vitesses de vent sont reportés sur la figure 6 suivante.

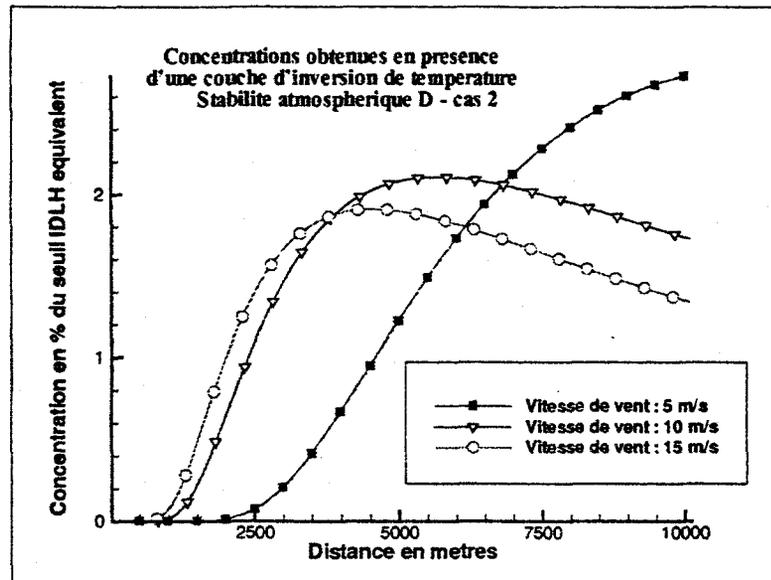


Figure 6: Evolutions des concentrations en fumées toxiques dans le cas du feu d'entrepôt de matières dangereuses et pour une stabilité atmosphérique D (neutre) associée à différentes vitesses de vent

Les évolutions de concentration en fumées toxiques reportées sur la figure précédente montrent que la concentration maximale calculée diminue lorsque la vitesse du vent augmente. Toutefois, à proximité du lieu de l'incendie (typiquement le premier km), les concentrations calculées sont « à l'opposé », c'est à dire plus importantes lorsque la vitesse du vent est forte. Ceci est à rapprocher de la remarque notée -2- au sous-chapitre 4.1.3 selon laquelle les panaches de polluants émis verticalement sont « couchés » ou « rabattus » vers le sol plus efficacement lorsque la vitesse du vent est importante.

5.3 Résultats obtenus pour le feu de soufre

Les résultats de calculs obtenus au moyen de DISFUM dans le cas du feu de soufre sont reportés sur la figure 7.

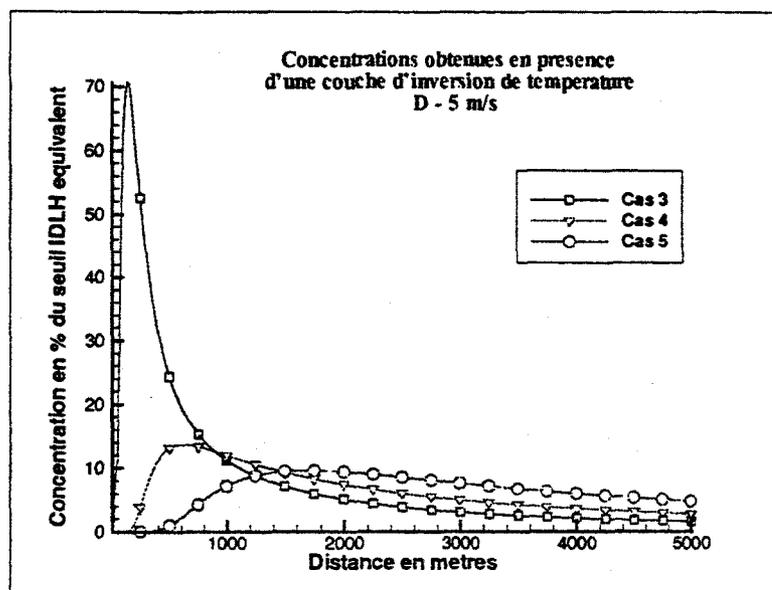


Figure 7 : Evolutions des concentrations en fumées toxiques (SO_2 en l'occurrence) dans le cas du feu de soufre et pour une stabilité atmosphérique D (neutre) associée une vitesse de vent de 5 m/s.

Les évolutions de concentration en fumées toxiques reportées sur la figure précédente montrent à nouveau que le seuil « IDLH équivalent » ne serait a priori pas atteint dans les conditions d'étude considérées.

En revanche, il est intéressant de noter que cette fois les concentrations maximales sont décroissantes lorsque l'on passe des cas 3, à 4 puis à 5, c'est-à-dire lorsque vitesse de combustion et puissance dégagée augmentent. Ce constat est très différent de celui effectué sur ces mêmes concentrations maximales pour le feu d'entrepôt.

Enfin, pour un observateur partant du lieu de l'incendie et s'en éloignant sous le vent des fumées, les concentrations les plus élevées seraient tout d'abord observées pour les vitesses de combustion et puissances dégagées les plus faibles. Toutefois, au delà de 1500 m d'éloignement, cette tendance s'inverse et les concentrations en fumées toxiques susceptibles d'être observées sont alors plus grandes lorsque la vitesse de combustion et la puissance thermique augmentent.

5.4 Résultats obtenus pour le feu d'une nappe de CS₂ liquide

Les résultats de calculs obtenus au moyen de DISFUM dans le cas du feu de CS₂ liquide sont reportés sur la figure 8.

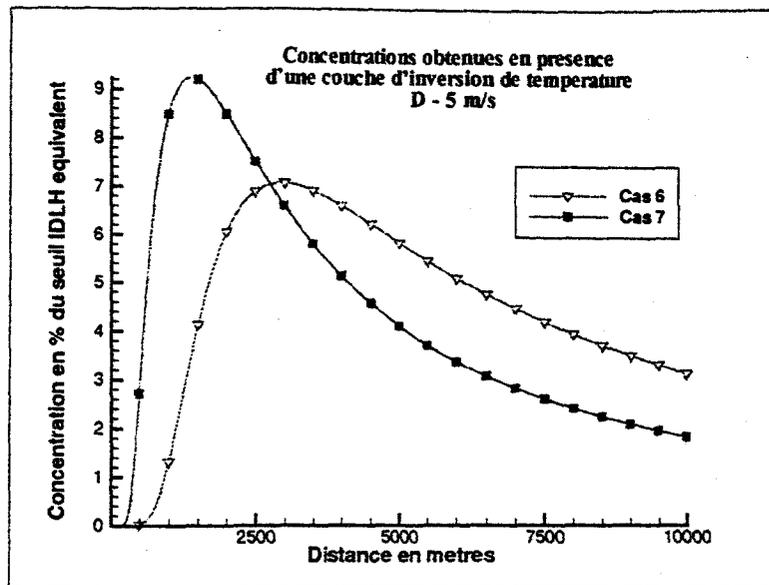


Figure 8 : Evolutions des concentrations en fumées pour le scénario du feu d'une nappe de CS₂ et pour une stabilité atmosphérique D (neutre) associée une vitesse de vent de 5 m/s.

S'agissant des évolutions de concentration en fumées toxiques reportées sur la figure précédente, les remarques formulées au paragraphe précédent s'appliquent totalement. Bien que non directement comparables, les résultats semblent cohérents par rapport aux simulations effectuées sur le même produit avec le code SMOKE développé par le HSE [29].

6. COMMENTAIRES GENERAUX - CONCLUSIONS

Des résultats précédents, il ressort qu'aucune des concentrations calculées ne dépasse le seuil IDLH équivalent des fumées toxiques considérées. Cette conclusion n'est toutefois applicable qu'aux strictes conditions retenues dans cette étude, qu'il s'agisse à la fois des caractéristiques considérées pour les feux ou des conditions météorologiques prises en compte. S'il en était besoin, un « retour d'expérience » vient tout récemment de justifier ces considérations de prudence : un feu de stockage de soufre de grande taille, survenu en décembre 1995 dans la région du Cap (Afrique du Sud) [34] a provoqué trois décès à distance respectable du sinistre...

Du point de vue de l'influence de la thermique, il ressort pour l'ensemble des cas étudiés que les concentrations en fumées toxiques calculées dans le champ proche de l'incendie

(typiquement des premières centaines de mètres aux premiers kilomètres) sont plus importantes pour les feux supposés de plus faible puissance. En revanche, dans le champ lointain (au delà du premier ou du second kilomètre), la tendance s'inverse et les concentrations calculées sont plus grandes lorsque la puissance thermique supposée est augmentée.

A ce stade, il convient de rappeler que tous les calculs présentés dans cette étude ont été effectués pour des feux toujours supposés en régime de combustion stable. En réalité, un incendie passe au moins par les deux phases transitoires que sont la montée en puissance et l'extinction du feu. Durant ces phases transitoires la puissance dégagée est plus faible qu'en régime stable. Si la conclusion précédente, obtenue pour des feux établis, s'applique aussi aux phases transitoires, il n'est pas à exclure que ces phases soient les plus critiques vis-à-vis des concentrations en gaz toxiques susceptibles d'être engendrées dans le champ proche sous le vent de l'incendie. En revanche, pour le champ lointain, il n'est a priori pas nécessaire de considérer des caractéristiques du feu autres que celles qui pourraient être observées en régime de combustion établi.

Rappelons enfin que les réalités industrielles imposent parfois la nécessité de pouvoir prédire correctement les conséquences potentielles dans les conditions suivantes :

- feux dont le régime est dicté par le taux de ventilation
- impact en champ très proche (moins de 150 m de la source).

L'INERIS a reçu le soutien du Ministère de l'Environnement pour inscrire ce type de préoccupation dans ses thèmes de recherche et développement actuels.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) *G. Marlair et F. Marlière*, « Incendie et risque toxique », communication présentée au colloque « gestion d'un incendie - Coordination industriels - sapeurs-pompiers », Le Havre, CCI, 10 octobre 1995.
- (2) *C. Cwiklinski, G. Marlair, R. Lodel*, « Combustibilité et inflammabilité des substances solides et liquides », *Revue Préventive-Sécurité*, Novembre-Décembre 1996
- (3) *V. Babrauskas*, « Related Quantities (a) Heat of Combustion and Potential Heat », chapitre 8 du livre « Heat Release in Fires », Edited by Babrauskas and Grayson, Elsevier Applied Science, 1992
- (4) *J. Kuchta*, « Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining and Fuel-related Industries », Bureau of Mines, bulletin n° 680, 1985
- (4bis) « Les carburants et la combustion », *Les Techniques de l'Ingénieur*, traité mécanique et chaleur, B250
- (5) *Weiss*, *Hazardous Chemical Data Book*, 1986
- (6) *K. Annamalai and W. Ryan*, « Interactive Process in Gasification and Combustion - II Isolated Carbon, Coal and Porous Char Particles », *Progress in Energy and Combustion Sciences*, vol 19, pp 387-388
- (7) *anonyme*, « Plastiques - Pouvoirs et potentiels calorifiques », *Infoplast*, février 1983

- (8) *A. Tewarson, G. Marlair, C. Costa*, « Prediction of Heat and Product Release Rates in well-ventilated Fires of Chemicals », soumis à la revue *Journal of Fire Sciences*
- (9) *C. Cwiklinski, G. Marlair*, Incendie de bacs, cuvettes et nappes de liquides inflammables : approches expérimentales, Journée technique «
- (10) *G. Marlair, C. Cwiklinski*, « Large-scale testing in the INERIS fire gallery : a Major Tool for both the Assessment and Scaling-up of Industrial Fires », Industrial Fires I, CEC workshop, Apeldoorn, March 1993, EUR 15340 EN
- (11) *G. Marlair, C. Cwiklinski, F. Marlière, H. Breulet, C. Costa*, « A Review of Large Scale Fire Testing Focusing on the Fire Behaviour of Chemicals », Interflam'96, Cambridge, UK, 1996
- (12) *G. Marlair, F. Marlière, S. Desmet, C. Costa, M. Leck, W. Siegfried*, « Experimental evaluation of the Fire Hazard of Organophosphorous Insecticides by Use of Various Test Methods », Industrial Fires III European Workshop, Roskilde, DK, Septembre 1996, EUR 17477 EN.
- (13) *C. Menguy, D. Gicquel*, « Méthodes Calorimétriques, une voie prometteuse », La revue des Laboratoires d'Essais, 1990, 24-31/33
- (14) *M. Janssens*, « Calorimetry », Section 3, chapter 2 of The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, SFPe-NFPA, Quincy, Ma, USA, 1995
- (15) *anonyme*, « Small-scale Testing saves Time, Material and Money », FMRC update, avril 1993
- (16) *A. Tewarson*, « Generation of Heat and Combustion Products », Section 3, chapter 4 of The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, SFPe-NFPA, Quincy, Ma, USA, 1995
- (17) *HC. Kung and P. Stavrianidis*, « Buoyant Plumes of Large-scale Pool Fires, 19th Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, 1982, pp 905-912
- (18) *B. Mc Caffrey, M. Harkleroad*, « Combustion efficiency, radiation, CO and soot yield from a variety of gaseous, liquid and solid fuels buoyant diffusion flames », 22nd Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1988 pp 1251-1261.
- (19) *G. Heskestad*, « Fires Plumes », Section 2, chapter 2 of The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, SFPe-NFPA, Quincy, Ma, USA, 1995
- (20) *G. Heskestad*, « Fire Plume Air Assessment according to two competitive assumptions », 21st Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, 1986, pp 111-120
- (21) *M.D. Delichatsios*, « Air Entrainment into buoyant jet flames and pool fires », Section 2, chapter 3 of The SFPE handbook of Fire Protection Engineering, SFPe-NFPA, Quincy, Ma, USA, 1995
- (22) (*G. Marlair*), « Les fumées d'incendie de stockage : aspects thermiques et chimiques », INERIS, Rapport Annuel Scientifique, 1995, pp 60-63
- (23) *G. Heskestad*, « Engineering Relations for Fire Plumes », Factory Mutual Research Corporation, Fire safety Journal, 7, 1984 pp 25-32.
- (24) *G. Heskestad*, « Fire Plume Behavior in Temperature-Stratified Ambients », Factory Mutual Research Corporation, Combust. Sci. and Tech., Vol. 106, pp. 207-228.
- (25) *X.C. Zhou and J.P. Gore*, « Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire », Combustion and Flame, Vol 100, 1995 pp 52-60.
- (26) *Hiroshi Koseki and Taro Yumoto*, « Air Entrainment and Thermal Radiation from Heptane Pool Fires », Fire Technology, February 1988, pp 33-47.

- (27) *G. A. Briggs*, « Plume Rise », U.S. Atomic Energy Commission, Office of information Services, 1969.
- (28) *Y. Mouilleau*, « Comment estimer la dispersion des polluants gazeux dans l'atmosphère », Etude bibliographique. Rapport INERIS réf. EXP-YMo Z1/1, 1991.
- (29) *D.A. Carter*, « Methods For Estimating the Dispersion of Toxic Combustion Products from Large Fires », Chem. Eng. Res. Des, Vol 67, 1989, 348-352
- (30) *F. Pasquill*, « Atmospheric Diffusion », 1974, Ellis Horwood.
- (31) *N.I.O.S.H.*, Pocket Guide to Chemical Hazards, U.S. Department of Health and Human Services, Juin 1990.
- (32) *anonyme*, « Controlling Fires in Pesticide Warehouses », Brochure éditée par le HSL
- (33) *E.E. Zukoski*, « Properties of fire plumes », ch. 3 de l'ouvrage « Combustion Fundamentals of fires », Geoff. Cox, Academic Press, 1995.
- (34) *H. Munnik*, « South African Sulphur Fire », Fire International, September 1996.